

Ministère de l'Agriculture
Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur agricoles
Institut de l'Olivier





Manuel d'irrigation de l'olivier

Techniques
Applications
Résultats de Recherches

Elaboré par: Mme Chiraz Masmoudi Charfi *

Evalué par : Mrs. Hamadi Habaieb **, Hédi Daghari **,

Révisé par : Mr. Kamel Gargouri *, Mme Jihène Karray-Abid ***

* Institut de l'Olivier
** Institut National Agronomique de Tunisie
***Ecole d'Agriculture de Mograne

2012

Ministère de l'Agriculture
Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieurs Agricoles
Institut de l'Olivier

Manuel d'irrigation de l'olivier Techniques et Applications

Elaboré par Docteur Masmoudi Charfi Chiraz*

Evalué par Professeurs Habaieb Hamadi**, Daghari Hédi**

Révisé et Amélioré par Docteurs Gargouri Kamel*, Rhouma Ali*, Karray-Abid Jihène***

* Institut de l'Olivier, Sfax
** Institut National Agronomique de Tunisie, Tunis
***Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne, Zaghouan

- 2012 –

Plan du manuel

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des Photos

Liste des Applications

Conversions usuelles

1 mm = 10 m^3/ha = 1 litre/m^2

1 centibar (1cb) = 1 Kilo Pascal (1 KPa)

Débit (l/s) = 1000 x débit (m^3/s) = débit (m^3/h) / 3,6 = 0,28 x débit (m^3/h)



Liste des Abréviations

a : paramètre de l'équation d'étalonnage des capteurs.
CEi : Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (mmhos/cm).
BL : Besoins en eau de lessivage (mm).
I : Apport d'eau d'irrigation (mm).
D : Pertes d'eau par drainage ou ruissellement.
d_a: Densité apparente du sol (mm).
d : Dose d'irrigation nette (mm).
D: Profondeur des racines (mm ou m).
ET_0: Evapotranspiration de référence (mm).
ET_c: Evapotranspiration de la culture (mm).
ETM : Evapotranspiration maximale (mm).
ETr : Evapotranspiration réelle ou demande en eau propre de la culture (mm).
ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).
E : Evaporation du sol (m).
E_a : Efficience d'application de l'irrigation.
EUE : Efficience d'utilisation de l'eau (Kg/m^3).
F_d: Densité de flux de sève brute ($l/h/dm^2$).
F: Flux moyen du capteur (l/h).
G1 : Mesures de l'humidité du sol effectuées dans un rayon de 1,4 m du tronc.
G2 : Mesures de l'humidité du sol effectuées dans un rayon de 2 m du tronc.
G3 : Mesures de l'humidité du sol effectuées dans un rayon de entre 2,2 et 2,8 m du tronc.
G4 : Mesures de l'humidité du sol effectuées dans un rayon de 4,2 m du tronc.
H_v : Humidité volumique du sol (%).
H_m : Humidité massique du sol (%).
HR_{max} : Humidité relative maximale de l'air (%).
HR_{min} : Humidité relative minimale de l'air (%).
K : Index de flux, sans dimension.
K_r: Coefficient relatif à la couverture du sol.
K_c: Coefficient cultural.
N : Nombre d'arbres.
N_{sol} : Mesure de la sonde à neutrons au sol.
N_{eau} : Mesure de la sonde à neutrons dans l'eau.
N* : Rapport de la mesure au sol (N_{sol}) par la mesure dans l'eau (N_{eau}).
P : Pluie (mm).
P_e : Pluie efficace (mm).
$\mathscr{P}$: Puissance de chauffage des capteurs (Watt).
P_f : poids frais de l'échantillon de sol (g).
P_s : Poids sec de l'échantillon de sol (g).
p = tarissement admissible de l'eau du sol.
RH : Traitement restriction hydrique contrôlée.
PI : Traitement pleine irrigation.

R = Rayon maximal moyen de la frondaison (m).
RU: Réserve utile du sol (mm).
RFU: Réserve facilement utilisable (mm).
R : Apport d'eau du sol à travers les réserves ou les remontées capillaires (mm).
R_g : Rayonnement global ($Cal/cm^2/jour$).
S : Surface de la frondaison projetée au sol (m^2).
S_a: Teneur en eau du sol (mm).
S_c: Section du bois conducteur d'un rameau ou du tronc (dm^2).
S_i : Teneur en eau du sol observée au début de la période d'étude.
S_f : Teneur en eau du sol observée à la fin de la période d'étude.
S_u : Surface utile par olivier égal au produit des écartements (m^2).
St : Section totale du rameau (dm^2).
T : Transpiration de la culture (mm).
T_a : Flux de sève moyen de la parcelle ($l/h/dm^2$)
T_x : Taux de couverture du sol par la végétation (%).
T_{max} : Température maximale et minimale de l'air (°C).
T_{min} : Température maximale et minimale de l'air (°C).
U_2 : Vitesse du vent mesurée à 2 m de hauteur (m/s).
V_{brut} : Volume brut d'eau par raie d'irrigation (m^3).
V_{net} : Volume net d'eau apporté par l'irrigation (m^3).

θ_{cc}: Humidité à la capacité au champ (mm).
θ_{pfp} : Humidité au oint de flétrissement permanent (mm).

ΔS : Variation du stock d'eau.
ΔT_a : Valeur actuelle de la différence de températures entre les sondes du capteur.
ΔT_{max} : Valeur maximale de la différence de température entre les sondes du capteur.
ΔT_{on} : Différence de température enregistrée à la fin de la période de chauffage
ΔT_{off} : Différence de température enregistrée à la fin de la période de non chauffage.

CADRE DES TRAVAUX DE RECHERCHES PRESENTES DANS CE MANUEL

- Travaux menés à la ferme de l'INAT à Mornag:

  Projet Tuniso-Belge INAT/CGRE. 1999-2000
  Projet de l'UE Dimas. 2004-2007

  Masmoudi-Charfi C., Masmoudi M.M., Mahjoub I., Karray-Abid J., Ben Mechlia N.,
  Avec la collaboration du cadre technique et ouvrier de la ferme.

- Travaux menés au Domaine expérimental de Taoues - Sfax:

  Dans le cadre des activités du LAPOAF 2008-2009.

  Masmoudi-Charfi C., Ayachi-Mezghani M., Laabidi F., Ben Reguaya S., Gouia M., Ouled Amor A., Bousnina M.
  Avec la collaboration du cadre technique et ouvrier du Domaine.

- Travaux menés à la Ferme expérimentale de l'INRGREF - Nabeul.

  Dans le cadre des activités du LAPOAF 2010.

  Masmoudi-Charfi C., Ben Dhiab Ali, Hamadi Ali, Alaoui Bilel.
  Avec la collaboration du cadre technique et ouvrier de la ferme.

Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidée et encouragée pour l'élaboration de ce Manuel. Je cite en particulier :

- Mesdames Boujnah Dalenda, Chaabouni Monia, Karray-Abid Jihène et Safia Siala,
- Messieurs Habaieb Hamadi, Gargouri Kamel et Rhouma Ali.
- Mes professeurs Ben Mechlia Nétij et Masmoudi Moncef,

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Dr. Masmoudi Charfi Chiraz

Chapitre 1

GENERALITES

1- Ressources en eau de la Tunisie

Le climat en Tunisie est de type Méditerranéen. Il est caractérisé par une pluviométrie irrégulière, inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Les quantités de pluies reçues annuellement vont de moins de 80 mm au Sud du pays à 1500 mm dans l'extrême Nord, avec une moyenne annuelle de 220 mm (Tableau 1).

Tableau 1. Ressources en eau de la Tunisie.

Ressource	Capacité
Apport pluviométrique moyen	220 mm # 36 Km^3/an
Eau de surface	
Medjerda	1,0 Km^3/an
Bassins du Nord	2,7 Km^3/an
Eau Souterraine	2,2 Km^3/an
Infrastructure hydraulique actuelle	
29 grands barrages	2170 Mm^3/an
223 barrages collinaires	195 Mm^3/an
812 lacs collinaires	135 Mm^3/an
95000 puits de surface équipés	745 Mm^3/an
5000 forages exploités	1420 Mm^3/an
Potentiel des ressources en eau	4865 Mm^3/an
Ressources mobilisables	4665 Mm^3/an

Hamza (2009).

Dans le Nord, le réseau hydrographique est dense. Au Centre et au Sud du pays, les eaux sont essentiellement d'origine souterraine représentées par des aquifères profonds.

2- L'olivier irrigué en Tunisie

L'olivier se trouve partout en Tunisie, mais il est conduit différemment selon la disponibilité de l'eau. Le manque de précipitations dans les régions du Centre et du Sud du pays a poussé les oléiculteurs à adopter des aménagements hydrauliques types Tabia et Jessr pour valoriser l'eau de pluie et/ou de ruissellement (El Amami, 1984 ; Snane, 1991). Dans les régions du Nord, l'agriculteur adopte un système de culture diversifié dans lequel l'olivier bénéficie des apports hydriques à travers l'irrigation de complément ou l'irrigation de cultures annuelles intercalaires (solanacées), le plaçant ainsi en second rang. Cette pratique est à l'origine d'une concurrence accrue entre les espèces cultivées aussi bien pour l'eau que pour les nutriments. Elle est également responsable de l'apparition de maladies cryptogamiques comme celles qui sont occasionnées par les agents de pourriture des racines ou le *verticillium.*

L'olivier irrigué couvre actuellement 66000 ha **(ONH, 2006)**. Cette superficie a connu une évolution lente et bien en dessous des prévisions. Toutefois, des extensions ont été réalisées dans différentes régions du pays, notamment au Kef, à Sidi Bouzid, à Siliana et à Zaghouan en vue d'augmenter et de stabiliser la production nationale qui oscille entre 60000 et 300000 tonnes d'olives/an. Ces fluctuations sont liées au phénomène d'alternance de la production, au manque de suivi et d'entretien de la plantation et à l'application de pratiques horticoles qui ne sont pas toujours adaptées au mode de conduite, en particulier dans les plantations intensives irriguées. L'irrigation, par exemple, est souvent pratiquée de manière empirique par manque de connaissances des besoins réels en eau de l'olivier, dont l'estimation pose le plus d'ambiguïté. Il en résulte des rendements faibles, ne dépassant pas 3T/ha alors que l'efficience de l'utilisation de l'eau oscille entre 0,5 et 1,5 Kg d'olives/m^3 d'eau apporté.

L'utilisation de techniques d'irrigation économes (localisée) et l'encadrement technique des oléiculteurs a permis l'amélioration de la productivité de leur plantation et une meilleure valorisation de l'eau. Malheureusement, ce résultat ne concerne qu'un nombre réduit d'oléiculteurs (certes en augmentation), étant donné que l'irrigation localisée ne concerne actuellement que 20% des plantations irriguées. Un grand nombre d'oléiculteurs continuent, en effet, à pratiquer l'irrigation de surface, qui est à l'origine d'une perte importante d'eau, à laquelle s'ajoute la mauvaise répartition des apports.

De nombreuses questions sont posées à cet effet, que l'on peut résumer en une seule :

Comment gérer l'oliveraie irriguée ?

Ce manuel, met à la disposition de l'agriculteur averti, le technicien, le vulgarisateur…etc. un ensemble de données pratiques qui permettent de mieux gérer, à la fois, la parcelle d'olivier et l'eau disponible. Toutefois, le choix d'une conduite donnée ou d'un système d'irrigation repose sur l'objectif à atteindre. **Par conséquent, on ne peut pas préconiser une conduite générale en raison de la diversité des conditions de culture et des modes d'irrigation. En effet, chaque plantation d'olivier doit être gérée en fonction des conditions locales de culture.**

Chapitre 2

POURQUOI IRRIGUER L'OLIVIER ?

Dans les actes de '*la Consultation sur l'Irrigation en Afrique*' entamé à Togo en 1997 (Phocaides, 2008), le terme «irrigation» a été défini comme «*l'application d'eau complémentaire à celle fournie directement par les précipitations naturelles pour la production agricole*».

Les travaux de synthèse publiés en matière d'irrigation de l'olivier (Gouard, 1975 ; Pansiot, 1977 ; Romano, 1977 ; FAO, 1989 ; Tiercelin, 1998 ; Bandino et Dettori, 2003) ont montré que l'apport de l'eau pendant des périodes précises de développement de l'arbre et des fruits améliore significativement leurs performances agronomiques.

1- Effet de l'irrigation sur la croissance

L'irrigation raisonnée permet d'augmenter:

- la longueur des pousses de 10 à 30% en moyenne (Samish et Spiegel, 1966 ; Dettori, 1987 ; Michelakis et Vougioucalou, 1988 ; Mickelakis *et al.*, 1993 ; Mickelakis, 1995 et 1996 ; Sole-Riera, 1989 ; Goldhamer et Fereres, 2001 ; Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008 ; Masmoudi-Charfi, 2008).
- l'activité des racines à travers une meilleure nutrition hydrique et minérale de l'arbre (Fernandez *et al.*, 1990 ; Fernandez *et al.*, 1991 ; Clothier et Green, 1994 ; Palese *et al.*, 2000 ; Dichio *et al.*, 2002).

Dans les plantations irriguées, une vague de croissance estivale est observée après le stade de durcissement des noyaux des olives. Elle produit en moyenne 30% de la croissance annuelle des pousses (Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008). Les plantations d'olivier conduites sous un régime pluvial présentent, par contre, seulement deux vagues de croissance, la première est printanière et, la seconde est automnale.

2- Effet de l'irrigation sur la fructification

L'irrigation raisonnée permet d'augmenter:

- le taux de nouaison qui peut atteindre 15% (Stylianou et Metochis, 1982 ; Fernandez Serrano et Vincent Abela, 1982).
- le nombre de sites potentiels de fructification (Mickelakis, 1986 et 2000).
- le calibre des olives et leur nombre de 15 à 40% (Dettori et Russo, 1993 ; Ozyilamaz et Ozkara, 1989 ; Michelakis, 1990 ; Dettori et Russo, 1993 ; Rallo, 2001)

L'irrigation assure également un meilleur contrôle de la chute des fruits avec une réduction significative de l'écart de calibre (Villemur et Delmas, 1978). Elle modifie favorablement la date de maturation des olives (Inglease *et al.*, 1996)

3- Effet de l'irrigation sur les paramètres de production

L'irrigation raisonnée améliore le rendement en olives et en huile de 20 à 30% **(Vernet, 1964 ; Bahri-Haddad, 1981 ; Bahri, 1982 ; Ben Mechlia et Hamrouni, 1978 ; Chaabouni, 1982 ; Le Bourdelles, 1982 ; Lavee, 1997 ; Sole-Riera, 1989 ; Moriana *et al.*, 2002, 2003 et 2006).**

L'apport de l'eau pendant les phases appropriées de croissance des fruits et de l'arbre permet de mieux contrôler l'alternance de production **(Poli, 1979 ; Michelakis, 2000)** et assure une meilleure reprise des boutures après leur plantation **(Institut de l'Olivier, 1994).**

L'efficience de l'utilisation de l'eau est au moins doublée par rapport au mode pluvial **(Vernet *et al.*, 1970 ; Laouer, 1978 ; Le Bourdelles, 1982 et 1984 ; FAO, 1986 ; Studutto, 1996 ; Nuberg et Yanusa, 2003).** Des valeurs allant de 2,5 à 5,0 Kg d'olives/m^3 d'eau apporté sont obtenues **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011)**.

Compte tenu de ces atouts, il est aujourd'hui de mise pour des raisons de rendement essentiellement, de pratiquer l'irrigation, mais de manière rationnelle pour maintenir la demande en eau à un niveau compatible avec les quantités disponibles et assurer l'équilibre entre la production et le développement végétatif.

Chapitre 3

L'EAU DANS LE SOL (RAPPELS)

1- Déplacement de l'eau dans le sol

Dans le sol, l'eau se déplace de proche en proche des zones humides vers les zones plus sèches. Son déplacement est multidirectionnel. Il est influencé par les caractéristiques du sol (profondeur, texture, porosité), celles du sous-sol et celles de la plante (systèmes radiculaire et aérien). Dans les sols tassés, compactes et à forte teneur en argile, l'écoulement de l'eau est lent, contrairement aux sols de texture légère qui sont dotés d'un pouvoir de filtration plus élevé.

2- Caractérisation de l'état de l'eau dans le sol

L'eau adhère aux particules du sol par une force dite **la tension superficielle** dont l'effet est plus ou moins important selon les caractéristiques du sol, la quantité d'eau présente dans la zone des racines et sa qualité. La tension superficielle est une 'pression négative' mesurée en *bar* à l'aide d'un **tensiomètre.** Elle est d'autant 'plus élevée' que l'eau est liée aux particules de sol et que celles-ci sont fines et compactées. La présence de sels renforce cette tension en créant une autre force appelée **la pression osmotique.** Ces forces ont pour 'effet' de limiter la mobilité de l'eau et donc sa disponibilité à la plante. Pour pouvoir absorber l'eau, les racines devront développer une force contraire dite **la succion radiculaire** qui doit être suffisamment élevée pour vaincre l'ensemble des pressions exercées par le sol.

3- Notions fondamentales

L'eau perdue par la plante lors de sa transpiration sous l'effet de la demande climatique doit être restituée pour que la culture puisse continuer à végéter et à produire. Cette eau est puisée par les racines dans les réserves du sol. La quantité d'eau disponible à la plante s'appelle **la réserve utile (RU).** Elle est exprimée en millimètre d'eau (mm) et est définie par la différence entre l'humidité du **point de ressuyage** et **celle du point de flétrissement,** *c.-à-d.* l'humidité mesurée à la capacité au champ et celle qui est mesurée au point de flétrissement permanent.

L'humidité à la capacité au champ (θ_{cc}) est l'humidité d'un sol ressuyé dans des conditions où le drainage est assuré librement. Le sol est théoriquement plein. Elle est mesurée à 1/3 bar.

L'humidité au point de flétrissement permanent (θ_{pfp}) est mesurée au laboratoire à 15 bars. C'est l'humidité du sol pour laquelle l'eau est retenue avec une intensité supérieure aux forces de succion des racines et dans ce cas, l'eau n'est pas accessible à la plante.

Au delà du point de ressuyage, le sol est saturé en eau ; la plante peut se trouver en situation d'asphyxie. En deçà du point de flétrissement, la plante ne peut plus absorber l'eau.

La **figure 1** donne un ordre de grandeur de la réserve utile du sol en fonction de sa texture.

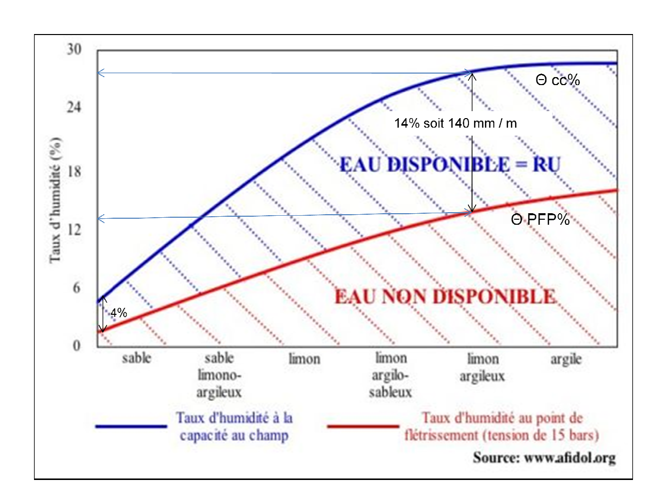


Fig.1. Ordre de grandeur de la réserve utile du sol (RU, mm) pour différentes textures.
(www.afidol.org, Adapté par Buckman et Brady, 1965).

La réserve utile est exprimée par : $RU = (\theta_{cc} - \theta_{pfp}) \times d_a \times D$

Avec d_a la densité apparente du sol (g/cm^3) et D est la profondeur des racines (m).

Le **tableau 2** donne une lecture de RU pour 1 m de profondeur de sol en fonction de sa nature.

Tableau 2. Ordre de grandeur de RU (mm/m) en fonction de la texture du sol.

Texture	Valeur moyenne de la réserve utile (mm/m)
Sableux	30
Argilo-sableux	120
Sablo-argileux	135
Argile-sableuse	170
Argile	180
Argile-limoneuse	180
Limon sablo-argileux	190
Limon argileux	220
Tourbes	350

CEMAGREF (1995).

Les sols sableux ont une forte proportion en éléments grossiers et une faible capacité de rétention de l'eau. Les sols argileux et riches en matière organique et en humus emmagasinent d'importantes quantités d'eau de part leur forte proportion en particules fines, mais ceci n'implique pas nécessairement une plus grande disponibilité de cette eau à la plante.

La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau accessible à la plante sans difficultés (Fig.2). C'est une fraction de RU. La valeur de RFU représente 30% à 60% RU en fonction du type de sol, de la plante, de la profondeur de ses racines, des conditions climatiques et du mode d'irrigation (**FAO, 1976 ; Allen *et al.*, 1998 ; Gendrier *et al.*, 1999**). Ce pourcentage est noté (p) et exprime **le degré de tarissement de l'eau dans le sol.**

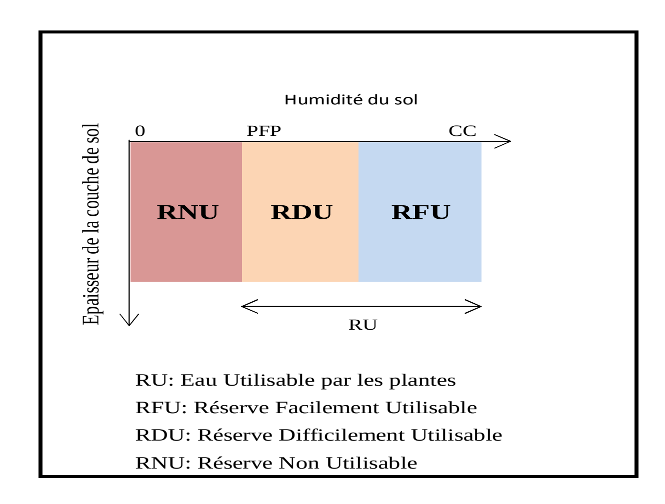


Fig.2. Représentation schématique des composantes de la réserve en eau du sol.

-Les observations de terrain ont montré que moins le tarissement en eau était important, plus l'eau était disponible aux cultures et plus élevés sont leurs développement et rendement.
-Lorsque RFU est consommée, la plante puise dans **la réserve difficilement utilisable** (RDU) si elle le peut ; elle ferme alors en partie ses stomates.
-Lorsque le sol atteint son point de flétrissement permanent, les racines ne peuvent plus absorber l'eau et les plantes finissent par flétrir.

Le tableau ci-dessous présente un ordre de grandeur de quelques paramètres du sol en fonction de sa texture.

Tableau 3. Valeurs de quelques propriétés physiques du sol en fonction de sa texture

	Texture lourde (fine)	**Texture moyenne**	**Texture légère (grossière)**
Humidité de saturation	55-65%	35-45%	25-35%
Humidité à la capacité au champ	32-42%	18-26%	8-10%
Humidité au Point de flétrissement	20-24%	10-14%	4-5%
θ_{cc}/θ_{pfp}	1,75/1	1,85/1	2/1
Densité apparente du sol (d_a, g/cm^3)	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6
Tension du sol à la capacité au champ (bar)	0,3	0,2	0,1
Tension du sol au point de flétrissement permanent (bar)	15,0	15,0	15,0
Temps requis pour passer de la saturation à la capacité au champ (h)	36-89	24-36	18-24
Taux d'infiltration (mm/h)	2-6	83-16	25-75

Phocaides (2008)

Selon les données disponibles, la réserve utile peut être déterminée en utilisant la valeur de la capacité au champ (Application 1) ou à partir du triangle des textures (Fig.3, Application 2).

Application 1

Détermination de la quantité d'eau retenue dans une couche de sol à partir de sa capacité au champ.

Données:

La capacité au champ (θ_{cc}) d'une couche de sol de 45 cm est de 18%.
Le rapport θ_{cc} / θ_{pfp} = 1,85.
La densité apparente du sol est d_a = 1,2 g/cm^3

Question:

Quelles est la quantité d'eau S_a retenue dans cette couche de sol en m^3/ha ?

Réponse:

θ_{cc} = 18%,
θ_{pfp} = θ_{cc} / 1,85 = 9,7%
θ_{cc} - θ_{pfp} = 18% - 9,7% = 8,3%
RU = 8,3 x 1,2 x 10 = 99,6 mm/m

Pour une profondeur de 45 cm, la réserve du sol est de:

$$S_a \text{ (mm)} = 8,3 \times 1,2 \times 10 \times 0,45 = 44,8 \text{ mm soit } 448 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Application 2

Détermination de la réserve utile du sol (RU, mm) à partir du triangle des textures.

Données:

Un sol caillouteux présentant 45% de terre fine sur un horizon de 50 cm de profondeur.
La terre fine est constituée de 28% d'argile, 55% de limon et 17% de sable.

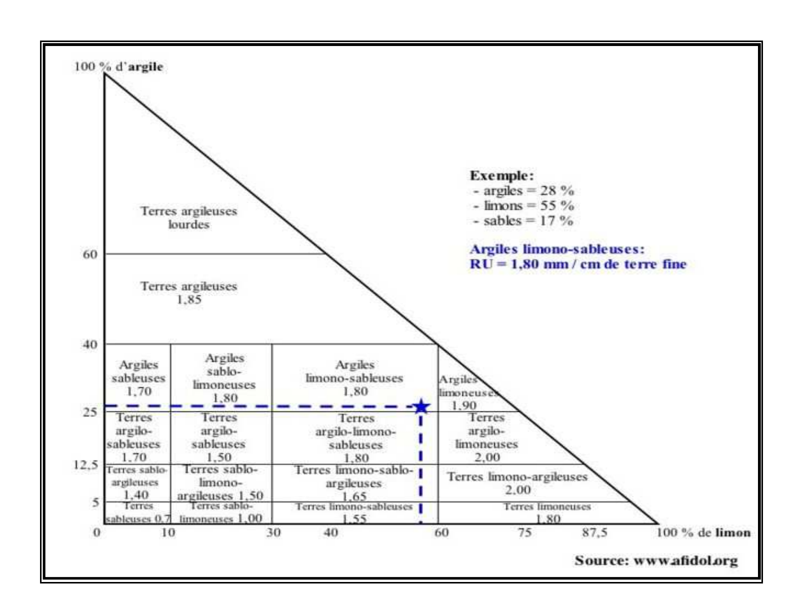


Fig.3. Triangle des textures.
(www.afidol.org)

Question:

Quelle est la valeur de RU sur cet horizon ?

Réponse:

D'après le triangle de texture (Fig.3), cet horizon correspond à des argiles limono-sableuses dont la RU s'élève à 1,80 mm d'eau par cm de terre fine.
Le sol est constitué de 45% de terre fine, la RU est de 0,8 mm par cm de sol, valeur obtenue comme suit : 1,80 mm x 0,45 = 0,8 mm.
L'horizon est profond de 50 cm, la RU de l'horizon est de l'ordre de 40 mm d'eau telle que:

$$RU = 0{,}8 \text{ mm / cm} \times 50 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$$

Ceci est équivalent à 400 m^3 d'eau / ha puisque 1 mm d'eau = 10 m^3/ ha.

Chapitre 4

CHOIX DES DENSITES DE PLANTATION EN FONCTION DE LA DISPONIBILITE DE L'EAU

L'olivier absorbe l'eau par les poils absorbants des racines en exploitant un volume de sol plus ou moins important selon les conditions de culture. La quantité d'eau absorbée dépend de la demande climatique, des caractéristiques du sol, de l'écartement entre les arbres, de la charge en fruits et de la disponibilité de l'eau, elle-même, dépendante des caractéristiques du sol.

Pour limiter la concurrence hydrique entre les oliviers, l'espacement entre les arbres doit être choisi en fonction de la disponibilité de l'eau. Il est en effet important de considérer ce paramètre comme le premier facteur déterminant dans le choix de l'espacement entre les cultures et le mode d'irrigation **(Loussert et Brousse, 1978 ; Piedra *et al.*, 1997 ; Lavee, 1997 ; Moriana *et al.*, 2006).**

En culture irriguée (permanente), les densités de plantation dans le système intensif classique varient de 204 pieds/ha (7m x 7m) à 278 (6m x 6 m) pieds/ha. Dans le système hyper-intensif, elles peuvent dépasser 1600 pieds/ha.

En culture pluviale, les densités à adopter varient en fonction de la pluviométrie de la région et des possibilités d'irrigation d'appoint.

Le **tableau 4** indique les écartements possibles, à adopter en fonction de la pluviométrie de la région **(Loussert et Brousse, 1978).**

Tableau 4. Ecartement à adopter en fonction de la pluviométrie de la région.

Pluviométrie (mm/an)	Densité à adopter	Ecartement correspondant
P > 500 mm	200-300 pieds / ha	7 m x 7 m jusqu'à 6 m x 6 m
400 mm < P < 500 mm	125 pieds / ha	9 m x 9 m ou 10 m x 8 m
300 mm < P < 400 mm	100 pieds / ha	10 m x 10 m ou 12 m x 8 m
250 mm < P < 300 mm	50-70 pieds / ha	12 m x 12 m jusqu'à 14 m x 14 m
200 mm < P < 250 mm	34 pieds / ha	17 m x 17 m
P < 200 mm	17 pieds / ha	24 m x 24 m

Loussert et Brousse (1978).

Cette classification a été établie en considérant la pluviométrie de la région comme étant la seule ressource en eau. Lorsque l'irrigation est possible, il est possible de passer à une classe supérieure de densités par **la densification de la culture**.

Chapitre 5

MODES D'IRRIGATION EN OLEICULTURE

1- Classification des systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation sont classés d'après Phocaides (2008) selon:

- *La méthode de distribution de l'eau* : irrigation de surface, irrigation localisée ou par aspersion.
- *Le type d'installation* : installation fixe, installation semi-permanente (les conduites principales et secondaires sont permanentes alors que les conduites latérales sont portables) ou portable.
- *La pression de fonctionnement :* c'est la pression hydraulique maximale requise pour le fonctionnement normal du système d'irrigation. Il existe trois systèmes de fonctionnement :

• Systèmes à basse pression : la pression requise varie de 2,0 à 3,5 bars;
• Systèmes à moyenne pression : la pression requise varie de 3,5 à 5,0 bars;
• Systèmes à haute pression: la pression requise est supérieure à 5,0 bars.

En Tunisie deux grands modes d'irrigation sont utilisés dans les plantations d'olivier: l'irrigation gravitaire ou de surface et l'irrigation localisée. L'irrigation par micro-aspersion est utilisée dans quelques plantations où l'olivier est associé aux grandes cultures.

2- Irrigation de surface ou gravitaire

2-1-Principe

L'irrigation de surface ou gravitaire consiste à reconstituer les réserves en eau du sol une fois que celles-ci sont épuisées.

2-2- Convenance

L'irrigation de surface ou gravitaire convient aux terrains à pente inférieure à 1% ou lorsque le sol et (ou) l'eau d'irrigation sont sujets à la salinité.

Ce mode d'irrigation permet le lessivage des sels, *c.-à-d.* leur déplacement en dehors de la zone des racines. Il peut être adopté en sols sableux moyennant un fractionnement de la dose d'irrigation (pouvoir de filtration élevé), mais il ne convient pas aux terrains à forte pente à cause du ruissellement et de l'érosion qu'il peut engendrer.

Pour les jeunes plantations d'oliviers âgées de 1 an et de 2 ans, il est possible d'irriguer soit au moyen d'une citerne et de cuvettes (1,0 à 1,5 m^2), soit en pratiquant l'irrigation localisée dès la mise en place des boutures. Dans les deux cas, la base du tronc doit être protégée par un monticule de terre afin d'éviter l'infiltration de l'eau au niveau du collet, laquelle est à l'origine de la pourriture des racines.

2-3- Distribution de l'eau

L'eau est distribuée par écoulement en couche fine directement à partir des conduites principales et secondaires dans de larges bandes, des rigoles ou des sillons nivelés au moyen d'un tracteur et confectionnés à ciel ouvert parallèlement aux lignes d'oliviers.

- La pente des bandes, rigoles ou sillons doit être supérieure à 3% et réalisée dans le même sens que celle du terrain.
- La profondeur des rigoles et des sillons varie de 10 cm à 15 cm.
- La longueur des bandes ou des rigoles varie de 50 m (sol sableux) à 150 m (sol argileux).
- La largeur des bandes est cadrée par l'aplomb des frondaisons.
- Le nombre de rigoles varie de 3 (sol argileux) à 6 (sol sableux).

2-4- Dose

Dans le cas de l'irrigation gravitaire ou de surface et pour une même plantation, **la fréquence des arrosages est variable** selon la demande en eau (saison) et le stock d'eau emmagasiné dans le sol, alors que **les apports se font à dose fixe** **(Tableau 5).**

Tableau 5. Doses d'irrigation (m^3/ha) appliquées en irrigation de surface à une plantation d'olivier adulte selon la région et le type de sol

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Annuel
Terre légère du Centre Oliviers sous 250 mm de pluie			500		500	500	500	500	500	3000
Terre à sable fin Pluviométrie de 250 mm			750			750		750	750	3000
Terre profonde, sable fin			1000			1000		1000		3000
Terre légère Zone littorale	500	500	500			500		500	500	3000
Terre profonde, sable fin Olive de conserve sous 400 mm de pluie						500	500	500	500	2000
Terre franche. Olive de conserve sous 400 mm						500	750	750	500	2500
Terre forte. Olive de conserve sous 400 mm						1000		1000	1000	3000

Loussert et Brousse (1978).

La quantité totale d'eau apportée par unité de surface représente la dose brute (mm ou en m^3/ha).

Dose brute = Volume brut / Surface arrosée = Durée x Débit / Surface.

Le volume brut (V_{brut}) par raie est égal au produit du débit à la source par le temps d'irrigation. Pour ce mode d'irrigation, seule une partie de l'eau distribuée est utilisée par la plante. Elle est appelée volume net (V_{Net}). Environ 30% de l'eau apportée en tête de raie est perdue par percolation. Les valeurs usuelles du débit par raie sont de 0,2 à 0,5 litre d'eau /s pour 100 m de longueur de la raie. Pour une raie de 200 m de long, il faut multiplier ces valeurs par 2.

2-5- Avantages et limites

L'irrigation gravitaire ne nécessite pas de technicité. Elle est la moins coûteuse mais également la moins performante. Elle ne permet pas une distribution uniforme de l'eau, en particulier lorsque les bandes ou les rigoles d'irrigation sont de longue portée.

2-6- Efficacité

Les pertes d'eau sont importantes et difficiles à évaluer **(Photo 1)**. **L'efficience de distribution de l'eau varie de 40% à 70% selon l'homogénéité du terrain et sa pente, *c.à.d.* que sur 100 litres d'eau apportés, 40 à 70 litres sont réellement profitables à la plante.**



Photo 1. Irrigation de l'oliveraie à la rigole.
Pertes d'eau et non uniformité de sa distribution.

2-7-Matériel

L'utilisation de conduites cimentées ou en PVC mou d'un diamètre compris entre 10 cm et 15 cm est recommandée pour améliorer les performances de ce mode d'irrigation. L'eau est distribuée de manière plus homogène sans contrecarrer les travaux d'entretien de la parcelle, en réalisant une économie de l'eau d'environ 40%.

2-8- Conclusion

*« L'irrigation de surface ou gravitaire est la méthode qui demande le plus de travail.
Elle est la moins efficace et celle qui gaspille le plus d'eau pour un résultat aléatoire.
Elle demeure toutefois la plus utilisée ».*

3- Irrigation localisée

3-1-Principe

L'irrigation localisée repose sur le maintien de la réserve en eau du sol à un niveau déterminé.

3-2-Convenance

C'est le système le plus adapté aux vergers en raison de l'apport ciblé de l'eau, qui est reçue au niveau du volume de sol occupé par la plus grande partie du système radiculaire.

3-3-Distribution de l'eau

L'eau est appliquée séparément à chaque arbre sur une fraction du sol au moyen de goutteurs ou de diffuseurs, en quantité précise et de manière fréquente. L'eau arrivant au champ s'infiltre dans le sol en humectant la zone des racines, verticalement par gravité et latéralement par effet de capillarité. Ce système utilise de faibles débits et de faibles pressions (2 à 3 bars). L'eau est mise sous pression grâce à une unité de pompage ou par l'intermédiaire d'un réservoir d'alimentation en eau situé en amont du champ.

Pour mener à bien l'irrigation localisée, il est nécessaire de:

- maintenir un même volume de sol humide (bulbe) pendant toute la saison d'irrigation.
- démarrer les irrigations sur un sol encore 'frais'.
- éviter les percolations en faisant coïncider les apports d'eau avec les besoins de la plante.

NB: En début de saison, la contribution du sol est supérieure à celle du bulbe humide, par contre, en fin de saison, l'eau du sol s'épuise, seul le bulbe d'eau alimente la plante.

La forme du bulbe humide dépend des caractéristiques du sol et de la quantité d'eau débitée **(Fig.4).** En terre légère et perméable, le bulbe est étroit. L'eau s'infiltre en profondeur. En terre lourde, le bulbe est large et moins profond.

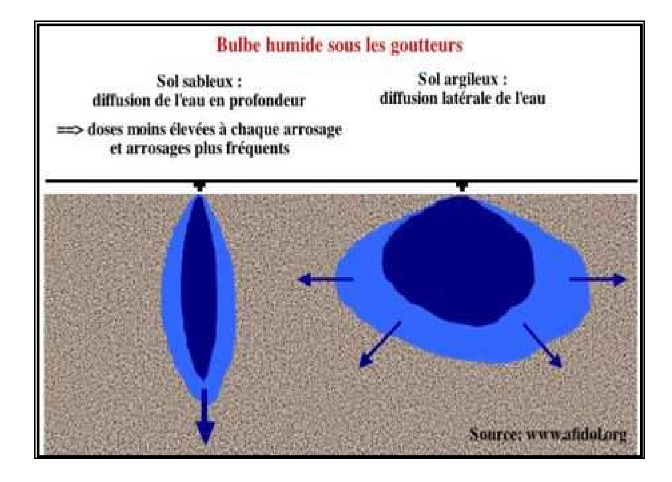


Fig.4. Distribution de l'eau en fonction de la nature du sol en irrigation localisée **(www.afidol.org).**

3-4-Dose et fréquence

Les doses d'irrigation varient en fonction des besoins en eau journaliers de la culture alors que les fréquences sont fixes.

Ce mode d'irrigation impose des apports rapprochés surtout en sols sableux et pendant les périodes de forte demande climatique. Il est important que le bulbe humide ne sèche pas ; de fortes quantités d'eau seront alors nécessaires pour sa reconstitution. Lorsqu'un épisode pluvieux permet de reconstituer plus de la moitié de la réserve facilement utilisable (RFU), l'irrigation peut être suspendue.

3-5-Matériel

Le système d'irrigation localisé est constitué par trois dispositifs pour le fonctionnement, la distribution de l'eau et le contrôle, permettant l'écoulement de l'eau de la station de source vers la parcelle **(Phocaides, 2008).**

Au niveau de la parcelle, le schéma général du système d'irrigation **(Fig.5)** est constitué de conduites enterrées (conduites principales) et de bornes de prise qui émergent à la surface du réseau.
Les bornes sont connectées à de plus petites conduites d'alimentation appelées 'adducteurs' qui, à leur tour, alimentent des conduites latérales posées le long des rangs de la culture et perpendiculairement aux adducteurs.
Ces conduites sont munies de distributeurs posés à intervalles réguliers qui fournissent l'eau uniformément entre les arbres avec une pression donnée.

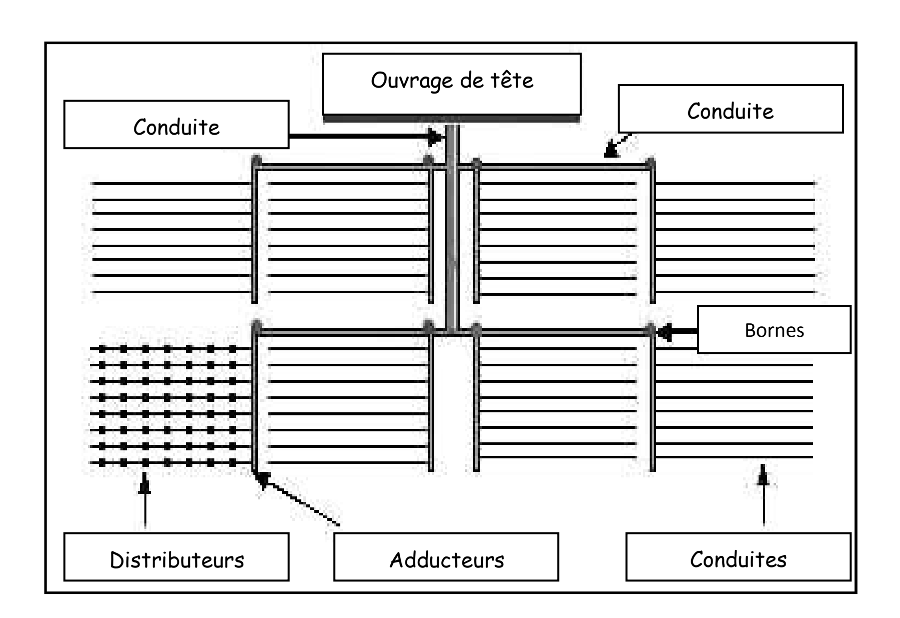


Fig.5. Représentation schématique d'un réseau d'irrigation localisée **(Phocaides, 2008)**

Ouvrage de tête

C'est l'unité de contrôle et de commande. Elle est constituée par une ligne d'alimentation de l'eau en PVC rigide ou acier galvanisé fileté, installée horizontalement à une hauteur minimale de 60 cm au-dessus du sol. Elle est équipée principalement d'un purgeur d'air, d'une valve de contrôle, d'une vanne de sectionnement, d'un injecteur d'engrais et d'une unité de filtration. On y trouve :

- **Tableau de contrôle :** muni de compteurs horaire et métrique et d'un programmateur de fonctionnement automatique.

- **Système de filtres :** à sable, à tamis ou à disques. Le filtre à sable est constitué par un empilement de matériaux plus ou moins fins (0,6-18 mm) selon la charge de l'eau en impuretés. Dans le cas d'une eau chargée, il est recommandé d'utiliser du gravier fin. Le filtre à tamis est généralement monté après le filtre à sable et est utilisé pour filtrer une eau moins chargée. Le filtre à disques est utilisé pour des eaux d'une charge moyenne. Il est généralement associé à un filtre à tamis.

Les faibles sections de passage de l'eau dans les distributeurs imposent l'utilisation d'une eau propre. De ce fait, le niveau de filtration de l'eau va dépendre de son origine :

- Pour les eaux de surface (rivière, lac) il est recommandé d'utiliser des filtres à sable et à tamis.
- Pour les eaux provenant de nappes (puits ou forages), les filtres à tamis sont à privilégier.

La station de filtration est un poste couteux qui s'amortit sur 3 à 4 ha au moins.

- **Mélangeur d'engrais :** C'est une cuve étanche d'une contenance variable (50 à 300 litres) dans laquelle l'engrais, solide mais soluble, est introduit. La cuve est montée en dérivation sur la conduite principale d'irrigation, à l'amont du filtre à tamis. La solution fertilisante ressort par le haut de la cuve et est injectée dans la conduite d'irrigation. Outre son usage pour la ferti-irrigation, ce système est utilisé pour nettoyer les conduites d'irrigation à travers l'injection de produits acides. La pompe doseuse est un appareil qui aspire et refoule alternativement une quantité constante et connue de solution fertilisante dans la conduite d'irrigation. Le fonctionnement du dispositif nécessite une pression minimale de 2 bars.

Conduites et de distribution de l'eau vers le champ

Ce système est constitué par des canalisations primaires, secondaires, des rampes d'irrigation **(Fig.5)** et des bornes de distribution de l'eau. Les conduites primaires véhiculent l'eau de la station de pompage vers les conduites secondaires, qui à leur tour conduisent l'eau vers les rampes d'irrigation, encore appelées portes-distributeurs d'eau. On y trouve les :

- **Conduites principales :** Elles sont généralement enterrées. Leur diamètre varie de 63 à 160 mm selon la dimension de l'exploitation.

-**Conduites secondaires :** Elles sont branchées sur la conduite principale. Elles sont de même type que les conduites principales.

- **Bornes de prise :** Elles sont branchées sur les conduites principales ou secondaires en amont de la parcelle et permettent la sectorisation de l'irrigation (équipées d'une vanne de sectionnement). Elles fournissent une partie ou la totalité de l'écoulement aux adducteurs.
Les conduites sont placées dans des boites de protection. Elles sont fabriquées en polyéthylène basse et haute pression ou en polypropylène. Ce dernier est utilisé pour les conduites de faible diamètre.



Photo 2. Vanne de distribution /sectionnement de l'eau.

- **Adducteurs** (conduites d'alimentation): ce sont des conduites de diamètre compris entre 50 mm et 75 mm qui sont connectées aux bornes et posées généralement en surface le long des limites de la parcelle pour alimenter les conduites latérales. Tous les types de matériaux à conduites disponibles peuvent convenir pour ces adducteurs.

- Conduites latérales ou rampes d'irrigation: ce sont des tuyaux d'irrigation en polyéthylène noir flexible. Ils sont placés à des endroits fixes, le long des lignes de culture et perpendiculairement aux adducteurs.

- **Distributeurs de l'eau** : ils sont insérés dans les rampes à intervalles réguliers. L'eau y entre avec un débit de 1 bar et en ressort sous pression.

* faible débit (1 à 8 l/h): ce sont des goutteurs (photo 3) simples, extensibles ou auto-régulants.
* débit élevé (20 à 60 l/h), l'eau y passe sous forme de jet (mini-diffuseurs ou ajutages calibrés).



Photo 3. Distributeur de l'eau (goutteur) fonctionnant à débit constant et régulier (www.afidol.org).

Parmi les critères de choix des distributeurs **(CEMAGREF, 1995)**:

- Qualité de l'eau d'irrigation: l'eau est d'autant moins bonne qu'elle contient des éléments susceptibles de boucher les distributeurs. Ces éléments sont de nature chimique (calcaire, fer), physique (sable, fragments de végétaux, argile, limon) ou biologique (micro-organismes). Une analyse de l'eau est nécessaire pour évaluer les risques de colmatage.

- Nature du sol : sur des sols à perméabilité moyenne ou faible, des goutteurs de 2 à 4 litres/h sont convenables (le bulbe humide s'étale). Dans les sols à forte perméabilité, l'eau a tendance à percoler en profondeur (le bulbe humide s'étiole). Il est préférable dans ce cas de choisir des diffuseurs qui humectent une surface de quelques m^2. Dans le cas de sol grossier et profond, ou d'argile gonflante présentant des fentes de retrait, il est préférable d'utiliser des mini-diffuseurs.

- Type de culture : les goutteurs de 4 l/h sont les plus utilisés en arboriculture.

- Topographie : lorsque la topographie de la parcelle est peu marquée ou qu'il est possible d'implanter des rampes de longueur limitée (100 à 200m), il est préférable d'utiliser des goutteurs non auto-régulants. Au contraire, dans le cas des plantations à topographie marquée et irrégulière ou de grande dimension, il est recommandé d'utiliser des goutteurs auto-régulants.

3-6- Critères et considération de conception

Le principal objectif est d'humecter le plus grand volume de sol par arbre tout en évitant la percolation en profondeur. Le volume minimal à humecter est de 35%. Il correspond à une superficie de sol allant de 10 m^2 à 12 m^2, avec un espacement de 5mx6m ou 6mx6m. La profondeur moyenne des racines sous irrigation goutte à goutte est de 60 cm. Selon la nature du sol, l'eau se répand comme il est indiqué dans le **Tableau 6.**

Tableau 6. Rayon moyen (cm) de diffusion latérale de l'eau des goutteurs en fonction de la texture du sol.

Type de sol	Rayon moyen d'épandage de l'eau
Texture légère	30
Texture moyenne	65
Texture fine	120

CEMAGFREF (1995).

À partir de ces indications il est possible d'adopter :

• **Une ligne simple de diffuseurs par rangée d'arbres**, avec des goutteurs placés tous les mètres le long de la ligne.

• **Un tracé circulaire ou en boucle autour de l'arbre**. Cette disposition compte 5 à 8 goutteurs autour de l'arbre, avec un diamètre du cercle variant de 1,2 m à 2,2 m. Les arbres jeunes seront munis de deux goutteurs seulement de chaque côté, placés à une vingtaine de cm du tronc.

• **Une double ligne de diffuseurs par rangée d'arbres,** soit une de chaque côté. Il est préférable de fixer les rampes à 1,2 m - 1,6 m du tronc de l'arbre adulte et à 0,4 m à 0,6 m lorsque l'olivier est plus jeune **(Photos 4 et 5).**

3-7-Normes de choix et d'utilisation

Ces normes concernent le système de sécurité qui permet de contrôler la pression et le débit de l'eau (monomètre, compteur d'eau, clapet anti-retour de l'eau et régulateur de pression). Les systèmes à huile sont dotés d'une grande précision. Les matériaux utilisés doivent supporter les pressions exercées mais également les risques d'oxydation engendrés par les produits. Une certaine facilité d'utilisation du matériel d'irrigation est requise.

Il est toutefois utile de :
- vérifier les normes de fonctionnement du système d'irrigation (spécifications techniques adaptées à la culture) lors de l'achat du matériel ainsi que les normes de sécurité,
- s'assurer de l'homogénéité de la distribution de l'eau qui doit être supérieure à 90% (effectuer un test d'uniformité en mesurant le débit d'un échantillon de distributeurs de l'eau).

Il est aussi utile d'entreprendre :

- une étude technique de faisabilité (sources d'eau, disponibilité et quantités en période de pointe, calcul des paramètres du réseau…),
- des contrôles réguliers des compteurs pour estimer les volumes distribués. Si une différence de 15-20% est constatée il faut chercher son origine (fuites, colmatages…).
- des contrôles réguliers des pressions qui doivent être stables pendant les irrigations et identiques d'une irrigation à l'autre. Si ce n'est pas le cas il faut se conformer au relevé du compteur d'eau pour calculer la pluviométrie réelle du réseau.

3-8-Entretien du réseau

L'entretien du système doit être effectué régulièrement afin d'éviter le colmatage des tuyaux, dû à la présence d'impuretés qui sont véhiculées par l'eau d'irrigation.

Le colmatage par le calcaire est traité à l'acide fort (en injectant dans le réseau d'irrigation une solution d'acide nitrique titrant de 2 à 5 litres de produit/m^3 d'eau). Le rinçage des rampes est obligatoire en fin d'opération.

Le fer précipité est difficile à éliminer. Il est important de s'assurer que l'eau ne contienne pas plus de 1,5 ppm de fer dissout et ce par une analyse préalable **(CEMAGFREF, 1995).**

Pour contrôler les micro-organismes, il est possible d'injecter de l'eau de javel à faible concentration (1 à 5 ppm) de manière périodique, par exemple à la fin de chaque irrigation.

A la fin de la saison d'irrigation, il est nécessaire d'ouvrir à l'air libre les rampes d'irrigation du côté aval (fin) pour faire évacuer les impuretés qui s'y sont accumulées durant la campagne.

Il est également nécessaire de nettoyer les filtres, voire même les remplacer, ainsi que les distributeurs d'eau (goutteurs) lorsque leur débit s'écarte de la norme sous l'effet de l'usure.

Il est également utile d'enrouler les rampes en dehors de la saison d'irrigation afin de les préserver **(Photo 4).**



Photo 4. Enroulement des rampes d'irrigation en hiver
et pendant les périodes de récolte et de taille.

Au démarrage de la campagne suivante, il faudra ré-étendre les rampes et les refermer à leur extrémité avale. Il est également nécessaire de contrôler la pression, le débit à l'amont et à l'aval des distributeurs de l'eau.

3-9-Efficacité

Lorsque le système goutte à goutte est correctement entretenu **(Photos 5 et 6),** son efficience d'utilisation de l'eau peut atteindre 90%, ***c.à.d,*** **pour 100 litres d'eau débités, 90 litres sont profitables à l'arbre.**

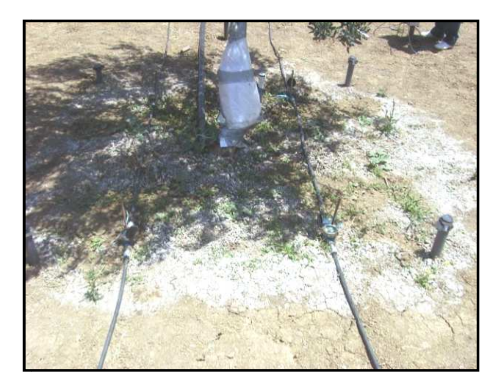


Photo 5. Fixation des rampes d'irrigation à 50 cm du tronc chez des oliviers âgés de 7-8 ans
et à 25 cm pour des arbres de 3-4 ans.

Pour s'assurer de l'efficacité du réseau d'irrigation il est utile de monter quelques compteurs d'eau en amont des rampes d'irrigation **(Photo 6)** afin de vérifier les quantités réellement fournies aux arbres.

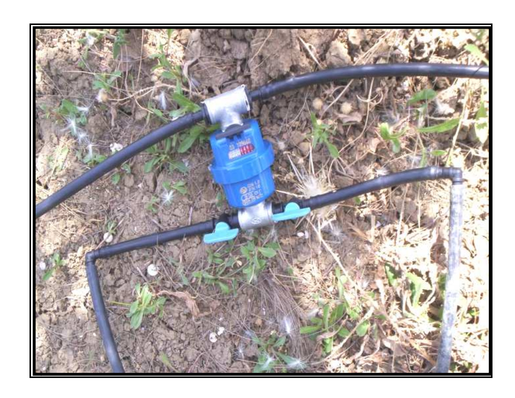


Photo 6. Compteur d'eau monté en amont des rampes d'irrigation pour la vérification des quantités d'eau fournies.

3-10-Avantages et limites

- L'eau est distribuée sur de grandes surfaces qui sont irriguées simultanément en utilisant des conduites fermées sous pression et en suivant le tracé le plus favorable (souvent le plus court).
- Ce système est économe de part son principe de fonctionnement. Il permet d'économiser 30-40% de l'eau d'irrigation par rapport au système gravitaire.
-Les doses sont contrôlées,
-L'utilisation de ce système est possible lorsque l'eau est chargée en sels avec un maximum de 3 g/l de RS. Les sels dissouts s'accumulent à la périphérie de la masse de sol humide et les plantes peuvent facilement puiser l'eau dont elles ont besoin.
-Utilisation sur des sols marginaux et d'accès difficile.
-La pratique de l'irrigation fertilisante : les engrais minéraux, correctement dosés, sont dissouts dans l'eau distribuée en rapport avec les stades de développement de la culture.
- Faibles besoins en main-d'œuvre, mais il est nécessaire d'avoir une certaine qualification de cette main d'œuvre et un entretien continu du système.

3-11- Coût

Le coût d'une installation complète d'irrigation goutte-à-goutte varie selon la densité de plantation puisque le nombre de goutteurs y dépend. Pour une plantation de 278 pieds/ha, le coût est évalué à 6000 DT. Le coût de l'ouvrage de tête représente 30% du coût total.

3-12-Conclusion

« L'irrigation localisée est la méthode la plus économe pour l'irrigation de l'olivette. Elle est la plus efficiente pour un résultat précis ».

4- Irrigation par micro-aspersion

4-1-Principe

L'irrigation en micro-aspersion repose sur la reconstitution du bulbe humide une fois que celui-ci est épuisé.

4-2-Convenance

Ce système convient aux terrains à fortes pentes et accidentés, mais ne convient pas lorsque l'eau est salée et dans les zones ventées.

4-3-Distribution de l'eau

L'eau est distribuée par des micro-asperseurs dont la portée dépend du débit et de la pression de la source d'eau. Elle est répartie sur toute la superficie sous forme de gouttes de pluie. La pression utilisée peut atteindre 5 bars. La forme du bulbe humide créée sous les micro-asperseur dépend de la texture du sol **(Fig.6)**.

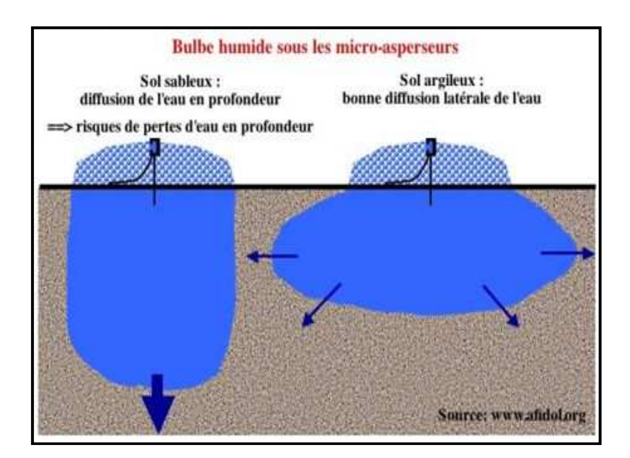


Fig.6. Distribution de l'eau en fonction de la nature du sol en irrigation par micro-aspersion (www.afidol.org).



Photo 7. Irrigation par micro-asperseur.

4-4-Dose

Les apports d'eau se font à **dose fixe** alors que la fréquence des irrigations est variable. **La fréquence des arrosages varie entre une à deux fois par semaine** selon la demande en eau mais également en fonction du type de sol et du micro-asperseur.

4-5-Matériel

Le matériel de la station de pompage et de distribution est comparable à celui du système d'irrigation localisée. Au niveau de la parcelle, l'irrigation se fait au moyen de rampes fixes ou mobiles, munies d'asperseurs rotatifs ou oscillants, de tuyaux percés de trous ou sprinklers.

4-6-Efficacité

Comparé au système gravitaire, l'irrigation par micro-aspersion est plus économe et permet une distribution plus homogène de l'eau. **La micro-aspersion a une efficience de 85 %, voire 80 % en cas de vent, *c.à.d.* sur 100 litres d'eau apportés, 80-85 litres sont réellement profitables à l'olivier.**

4-7-Avantages et limites

- L'humectation des parties aériennes de l'arbre sous climat chaud crée un microclimat favorable au développement de pathogènes sur les feuilles, les branches et le tronc.
- Les micro-asperseurs sont très sensibles à la pression de l'eau. Pour avoir un débit régulier et la même quantité d'eau distribuée sur toutes les parties de l'oliveraie, particulièrement celles qui sont en coteaux, il faut disposer d'une pompe et multiplier le nombre de micro-asperseurs et de régulateurs de pression, ce qui augmente le coût de l'installation.
- Une certaine qualification de la main d'œuvre est requise pour le fonctionnement du système et son entretien.
- Ce système ne permet pas l'application de l'irrigation fertilisante au sol, mais il permet la pulvérisation des engrais foliaires ou pesticides.
- Ce système permet d'atteindre la quasi-totalité de la zone des racines. Les colmatages sont moins fréquents par rapport au système goutte à goutte. L'installation est déplaçable pour permettre le travail du sol.

5- Dispositifs d'automatisation

C'est un système d'irrigation équipé de dispositif automatique de commande de l'irrigation :

-Les électrovannes: ce sont des vannes automatiques qui sont commandées à distance pour démarrer ou arrêter l'écoulement de l'eau.
-Les dispositifs de commande : ce sont des dispositifs automatiques de programmation de la durée de fonctionnement qui commandent les valves automatiques (électriques) à distance. Il existe plusieurs types qui permettent une programmation sur plusieurs jours.
-Les vannes volumétriques automatiques à compteur. Elles comprennent un compteur volumétrique, une commande de pilotage et un mécanisme de fermeture. Lorsque le volume prédéterminé a été distribué, la vanne se ferme automatiquement.

6-Conclusion générale

Le choix du système d'irrigation repose sur un certain nombre de paramètres dont il faut en tenir compte un à un. Mais quelque soit ce choix et **avant de décider du système d'irrigation, il faut:**

- Réaliser une étude préalable des ressources en eau (source d'eau permanente ou pas).
- Vérifier la qualité de l'eau au moyen d'analyses qui se font en période de consommation de pointe.
- Penser à construire un bassin de collecte de l'eau qui sera placé en hauteur par rapport à la parcelle à irriguer d'une dizaine de mètres et qui sera nettoyé régulièrement **(Application 3).**

- Tout projet d'irrigation pour une plantation d'olivier doit être accompagné par une étude du système de drainage sauf dans le cas de sols filtrants, ne présentant pas de substratum proche du sol. Ce réseau de drainage permet l'évacuation des eaux apportées en excès, le lessivage des sels et surtout d'éviter les problèmes d'hydromorphie associés à un risque de salinité ; dans quel cas des solutions sont à apporter notamment **une plantation sur ados (Photo 8).**



Photo 8. Plantation sur ados dans le cas d'une hydromorphie du sol associée à la salinité **(Larbi, 2011).**

D'autre part, il est à noter que :

- Dans les systèmes d'irrigation sous pression, les pertes d'eau sont quasiment nulles. Au cours de l'irrigation, les pertes varient de 10% en micro-irrigation à 30% en aspersion conventionnelle ainsi qu'en irrigation de surface.

-La main-d'œuvre requise pour le fonctionnement et l'entretien des réseaux en conduites sous pression varie entre 1/10 et 1/4 de celle nécessaire pour les canaux à ciel ouvert.

- Le coût des installations fixes pour l'irrigation localisée est plus élevé que celui des systèmes à aspersion. Il représente environ 50% du coût total d'installation de la parcelle.

Application 3

Taille du réservoir d'eau d'irrigation
(Bassin de collecte de l'eau)

La capacité du réservoir d'eau (bassin) doit permettre d'emmagasiner une réserve qui assure l'irrigation de la parcelle pour une période d'un mois afin d'éviter les pénuries pendant les périodes critiques de développement de l'arbre et des fruits.

Données:

Au cours de la période de pointe, la consommation en eau d'une oliveraie en production s'élève à environ 80 litres/jour/arbre.

Question:

Quelle taille adopter pour le bassin ?

Réponse:

Pour une plantation de 278 pieds/ha consommant 80 litres d'eau /jour/arbre pendant le mois de juillet (période de pointe) et cultivée à 6mx6m, la consommation totale en eau sera de :

$$80 \text{ litres / jour} \times 278 \text{ pieds / ha} = 700 \text{ m}^3$$

La taille du réservoir sera de cet ordre de grandeur.



Photo 9. Nettoyage du bassin d'irrigation tous les 2-3 ans.

Chapitre 6

BESOINS EN EAU DE L'OLIVIER

METHODE CLIMATIQUE

1- Introduction

La transpiration est régie par la demande climatique **(FAO, 1987).** Pour fonctionner convenablement, l'arbre doit absorber autant d'eau qu'il en perd. La sortie de l'eau se fait au niveau des feuilles à travers leurs stomates. C'est grâce à ce processus que se fait la montée de la sève brute et l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par les racines. Par l'irrigation, on intervient pour compenser ces pertes d'eau lorsque les réserves naturelles du sol ne sont plus suffisantes pour alimenter correctement la culture. Dans le cas de l'olivier, qui est considéré comme l'arbre fruitier xérophyte par excellence, les travaux menés sur l'irrigation ont montré qu'il peut valoriser hautement l'apport de l'eau. Cependant, pour obtenir une bonne efficience d'utilisation de cette eau, il est nécessaire de connaitre ses besoins réels en rapport avec son développement **(Allen *et al.*, 1998 ; Villalobos *et al.*, 2000 ; Masmoudi *et al.*, 2004 a)**.

2- Notions fondamentales

« *Les besoins en eau d'une culture durant une période donnée sont représentés par la hauteur d'eau (mm) nécessaire à cette culture pour compenser les pertes d'eau enregistrées pendant cette même période sous l'effet de la demande climatique* » **(Allen *et al.*, 1998).**

Déterminer les besoins en eau de la culture de l'olivier, revient à estimer son évapotranspiration, notée ET_c, qui est définie pour un stade de développement donné et pour des conditions optimales de culture (bonne alimentation hydrique et minérale, pas de maladies, pas de mauvaises herbes) en vue d'une production maximale **(Allen *et al.*, 1998).**

L'évapotranspiration de la culture (ET_c) est calculée en fonction de l'évapotranspiration de référence, notée ET_0 (mm), d'un coefficient cultural K_c qui dépend de l'espèce et de son stade de développement et en rapport avec le taux de couverture du sol par la végétation qui est exprimé par le coefficient K_r.

3- Expression de l'évapotranspiration de la culture et ses composantes

3-1- L'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence est définie comme étant « *l'ensemble des pertes en eau par évaporation et par transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau et en sels minéraux et indemne de maladies*».

La valeur de l'ET_0 (mm/jour) peut être déterminée à partir de mesures lysimétriques **(Deidda *et al.*, 1990 ; Caspari *et al.*, 1993)** ou de mesures du bac d'évaporation classe A ou encore calculée à partir de la formule universelle de Penman-Monteith **(Allen *et al.*, 1998)**. Dans ce cas, des mesures journalières des données climatiques de la région de culture sont requises.

Les données climatiques sont collectées au niveau d'une station météorologique classique ou d'une station automatique **(Photos 10 et 11)**. Dans les deux cas, la pluviométrie (P), les températures maximale (T_{max}) et minimale (T_{min}), les humidités maximale (HR_{max}) et minimale (HR_{min}) de l'air, la vitesse du vent (U_2) et le rayonnement global (R_g) y sont enregistrés à une échelle de temps horaire ou journalière.



Photo 10. Station météorologique classique.



Photo 11. Station météorologique automatique

Une fois les données climatiques saisies, il est possible de calculer directement ET_0, au moyen d'une feuille Excel **(Application 4)** établie par la FAO.

Application 4

Estimation de l'évapotranspiration de référence ET_0 (mm) d'une région donnée en fonction de ses paramètres climatiques par la Méthode universelle de la FAO (Allen et al., 1998).

L'ET_0 se calcule en fonction de la latitude et de l'altitude de la région considérée et des paramètres climatiques journaliers.

ETo : feuille Excel de la FAO. برمجية الفاو كميات المياه المتبخرة يوميًا

Calcul de Eto

latitude	36,83
altitude	10

Année	mois	jour	Tmin	Tmax	Tm	RHmin	RHmax	RHm	U2	SS	Rg	EToJ
									m/s	h	cal/cm2/j	mm/j
2003	1	1	5	10	8	40	46	43	2,50	4	300	1,9
2003	1	2	7	11	9	41	49	45	2,00	5	280	1,7
2003	1	3	6	9	8	45	51	48	3,00	4,5	260	2,0
2003	1	4			0			0				
2003	1	5			0			0				
2003	1	6			0			0				
2003	1	7			0			0				
2003	1	8			0			0				
2003	1	9			0			0				
2003	1	10			0			0				

NB : Les données colorées sont celles de la région de Mornag.

A mesure que les données sont saisies, la valeur de l'ET_0 est calculée.

Certaines stations météorologiques utilisent un bac d'évaporation classe A pour estimer ET_0. Ce bac est standardisé. Il constitué d'une plaque d'acier galvanisée de forme circulaire, revêtue de peinture aluminium ou de métal de 0,8 mm d'épaisseur. Son diamètre est de 121 cm et sa profondeur de 25,5 cm (standard). Il est placé à 15 cm au-dessus du niveau du sol sur un support en bois et rempli d'eau jusqu'à 5 cm du bord. Un dispositif simple ou automatique permet de mesurer la baisse du niveau d'eau consécutive à son évaporation. Les mesures sont effectuées chaque matin à la même heure. On rétablit le niveau d'eau quand il s'abaisse à 7,5 cm en dessous du bord du bac. L'évapotranspiration de référence (ET_0, mm) est déterminée en calculant le produit de la mesure du bac par le coefficient du bac (0,8) **(CEMAGREF, 1990).**

3-2- Le coefficient cultural K_c

Le coefficient K_c est utilisé pour tenir compte des caractéristiques de la culture. Il varie en fonction de l'âge de la culture, de la saison et du stade phénologique **(Le Bourdelles, 1982, Pastor *et al.*, 1998 ; Testi *et al.*, 2004)**. A défaut de mesures locales, il est possible d'utiliser les valeurs ci-dessous mentionnées.

Pour de jeunes oliviers, **Le Bourdelles (1977)** recommande l'utilisation des valeurs suivantes:

- 0,3 pendant les deux premières années de culture (1 an et 2 ans).
- 0,4 pour les trois années suivantes (3 à 5 ans).
- 0,5 après la 5^{ième} année.

Pour des oliviers adultes en production, **Pastor et Orgaz (1994)** et **Fernandez et Moreno (1999)** recommandent les valeurs indiquées dans le **Tableau 7.**

Tableau 7. Valeurs mensuelles de K_c pour des oliviers adultes plantés au Sud de l'Espagne à la densité de 286 pieds/ha et couvrant 34% du sol.

	J	F	M	A	M	J	J[†]	A	S	O	N	D
K_c	0,50	0,50	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,55	0,60	0,65	0,50

Pastor et Orgaz (1994); Fernandez et Moreno (1999).

La variation des valeurs de K_c traduit la variation de l'activité de la plante et de l'état hydrique du sol en surface. Durant les mois du printemps et de l'automne, la croissance rapide de l'arbre au niveau des pousses et la fréquence élevée de l'humectation du sol par les pluies se traduisent par des valeurs élevées de K_c. En période estivale, les faibles valeurs de K_c sont le résultat du ralentissement de l'activité physiologique de la plante et de la réduction de la fréquence des évènements pluvieux.

3-3- Le paramètre minoratif K_r

Les valeurs de K_r à utiliser lorsque le pourcentage de couverture du sol par la végétation est inférieur à 60% sont données au **Tableau 8.**

Tableau 8. Valeurs du coefficient K_r pour différents taux de couverture du sol par la végétation.

Pourcentage de couverture du sol	K_r
Plus de 50%	1,00
40 - 50 %	0,90
35 - 40 %	0,80
30 - 35 %	0,75
Inférieure à 30 %	0,70

COI (1997).

Application 5

Calcul du taux de couverture du sol et choix de K_r

Données :

Le rayon maximal moyen de la frondaison mesuré sur 5 jeunes oliviers représentatifs de la parcelle est : R = 2m

Question:

Quel est le taux de couverture du sol pour ce verger ?

Réponse :

La surface projetée au sol, S, déterminée à partir de R est égale à : $S = \prod x\ R^2$,
Soit : $S = 3{,}14 \times 2^2 = 12{,}6\ m^2$

Si les oliviers sont plantés selon un écartement de 6mx6m, la surface utile par olivier S_u est égale à S_u = 6mx6m = 36 m^2

Le taux de couverture du sol par la végétation, noté T_x (%), est égal à :
T_x = 12,6/36 x 100 = 35%

En référence au **Tableau 8**, la valeur appropriée de K_r est égale à 0,75.

3-4- L'évapotranspiration de la culture

L'oliveraie est caractérisée par un sol partiellement couvert. Dans ce cas, l'évapotranspiration de la culture (ET_c, mm) s'écrit :

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_r$$

Avec :
K_c: Coefficient cultural.
K_r : Coefficient minoratif pour tenir compte du taux de couverture du sol par la végétation.
ET_0 : Evapotranspiration de référence (mm).

Le **tableau 9** présente les valeurs calculées des besoins en eau de la culture de l'olivier (ET_c) par la méthode de la FAO en fonction de l'âge, du stade de développement et de la région de culture. Les valeurs de l'ET_0 sont issues de mesures lysimétriques **(Nasr, 2002).**

Tableau 9. Besoins en eau de la culture de l'olivier (ET_c, mm) selon l'âge et le stade de développement pour différentes régions de la Tunisie.

Age	Plus de 10 ans		5-10 ans		3-5 ans		1 an et 2 ans	
Région / Période	1	2	1	2	1	2	1	2
Région de la basse vallée de la Medjerda	489	38	311	24	217	17	163	13
Medjez et Bab, Amdoun, Joumine, Bousselem, Testour, Teboursouk, Béjà et Jendouba	539	51	342	32	239	23	180	17
Sousse, Ksar Hellal, Monastir, Mahdia, Moknine, Teboulba, Jemmel et El Jem	509	57	323	36	226	25	170	19
Sbeitela, Feriana, Sbiba, Tala et Kasserine	600	67	381	43	267	30	200	22
Gabes	468	63	297	40	208	28	156	21
Ouasis du sud	660	59	419	37	293	26	220	20
Sidi Bouzid et Meknassi	462	84	294	53	206	37	154	28
Cap Bon	426	50	271	32	189	22	142	17

Période 1: 10 Février – 20 Mars.   Période 2: 20 Mai – 10 Octobre.

Sources: Masmoudi-Charfi C., *et al.*, 2006. Document Technique N°2. Institut de l'Olivier.
Masmoudi-Charfi C., 2006. Document Technique N°3. Institut de l'Olivier.

Remarques:

-Dans le but de réduire les quantités d'eau d'irrigation, des recherches ont été menées dans différentes régions de la Tunisie en utilisant le concept de **l'irrigation déficitaire.** Les résultats ont montré que les valeurs présentées dans le tableau précédent ainsi que dans les références précitées peuvent être réduites de moitié sans pour autant affecter la croissance ou la production **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2010).**

- La méthode de la FAO estime à la fois la transpiration de l'arbre et l'évaporation du sol, ce qui peut majorer la quantité d'eau d'irrigation.
- Les pluies profitables à l'olivier (pluies efficaces) et les réserves en eau du sol ne sont pas quantifiées.
- Les variations de l'ET_0 enregistrées d'une année à l'autre nécessitent l'acquisition de données météorologiques sur un grand nombre d'années pour un pilotage pointu.
- Les coefficients culturaux publiés dans la littérature ne sont pas toujours adaptés à l'oliveraie puisqu'ils varient d'un verger à l'autre en fonction de la surface occupée par la frondaison et de la densité du feuillage.

Chapitre 7

CALCUL DES PARAMETRES DE L'IRRIGATION

L'irrigation est pratiquée selon un programme prédéterminé dans lequel un certain nombre de paramètres sont estimés telle que la dose et la fréquence des irrigations, la durée du tour d'eau…etc. Ces paramètres sont calculés comme il est indiqué dans ce qui suit.

1- Poste d'irrigation

C'est la surface cultivée pouvant être arrosée simultanément. La taille du poste dépend du débit par hectare et du débit de la source d'eau.

Surface du poste (ha) = Débit de la source d'eau (m^3/h) / Débit par ha (m^3/ha)

Application 6

Taille du poste d'irrigation

Données:

On considère une plantation d'oliviers de 1 ha, plantée selon l'écartement de 6m x 6m. Les arbres sont équipés chacun de 4 goutteurs débitant 4 l/h. Le réseau d'irrigation est muni d'une pompe fournissant 3,6 m^3 d'eau /h (1 l/s).

Question:

Quelle est la taille du poste d'irrigation ?

Réponse:

- Débit par arbre = 4 goutteurs x 4 l/h = 16 l/h
- Nombre d'arbres par hectare (1 ha = 10000 m^2) = 10 000 m^2 / (6m x 6m) = 278 arbres
- Débit par hectare = 278 arbres x 16 l/h/arbre = 4448 l/h/ha = 4,4 m^3/h/ha
- Taille du poste = 3,6 (m^3/h) / 4,4 (m^3/h/ha) = 0 ha 82 ares.

2-Durée de l'irrigation

C'est la durée nécessaire pour irriguer un ensemble de parcelles avec la même source d'eau.

Durée de l'irrigation (heure) = Durée de l'irrigation par poste (h) x Nombre de postes raccordés à la même source d'eau

Application 7

Durée de l'irrigation

Données:

La dose journalière à apporter sur une plantation d'oliviers de 10 ha est de 1 mm.
Les arbres sont espacés de 6mx6m et équipés chacun de 4 goutteurs de 4 l/heure.
Le réseau d'irrigation est approvisionné par une borne fournissant 6 m^3/h.

- Débit par arbre = 4 goutteurs x 4 l/h = 16 l/h
- Surface occupée par un olivier, S_u = 6m x 6m = 36 m^2
- Nombre d'arbres par ha = 10 000 m^2 / (6 m x 6 m) = 278 pieds
- Débit par ha = 278 arbres x 16 l/h/arbre = 4448 l/h/ha = 4,4 m^3/h/ha

Question:

Quelle est la durée de l'irrigation ?

Réponse:

- Taille du poste = 6 m^3/h : 4,4 m^3/h/ha = 1 ha 36

- Nombre de postes sur le verger = 10 ha : 1,36 ha = 7,35 soit 7 postes

- Durée de l'irrigation par poste = 1 mm x (6m x 6m) : 16 l/h = 2,25 h ou 2 h et 18 mn

- Durée totale de l'irrigation = 2,25 h x 7 postes = 15 h 45 min.

3- Déclenchement de l'irrigation en début de campagne

La date de déclenchement de l'irrigation en début de campagne dépend de la quantité d'eau disponible dans le sol, définie par:

Eau disponible = Réserves du sol + Pluies utiles

L'apport de l'eau pourra se faire comme il est indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 10. Pilotage de l'irrigation en fonction du système d'irrigation.

Système d'irrigation	Moment d'apport de l'eau
Goutte à goutte	Epuisement de la moitié de RFU
Micro-aspersion et gravitaire	Epuisement de la totalité de RFU

Tron *et al.*, (2000)

La réserve du sol peut être déterminée au moyen de mesures gravimétriques.

4- Périodes d'apport de l'eau

L'olivier passe au cours de son cycle de développement par différents stades (Sanz-Cortès, 2002), qui se succèdent tout au long d'un cycle de végétation :

Mars - avril : Développement des feuilles, des pousses et floraison.
Mai - juin : Nouaison des fleurs, croissance des olives et durcissement de leurs noyaux.
Juillet : Croissance des fruits et des pousses végétatives (en irrigué).
Août : Croissance lente des fruits et des pousses végétatives. Début de synthèse de l'huile (lipogenèse).
Septembre : Croissance rapide des fruits et des rameaux. Véraison : les olives sont tournantes, couleur violacée. Récolte des variétés précoces (Lucques, Manzanille).
Octobre : La croissance des fruits et des rameaux se poursuit. Récolte de la variété Picholine.
Novembre : Ralentissement de la croissance végétative. Récolte des olives à huile.
Novembre - Janvier : Croissance végétative faible à nulle. La récolte des olives à huile se poursuit.
Janvier - Mars : L'olivier est en quiescence hivernale.

La figure 7 présente les stades de développement des fruits et l'évolution saisonnière de l'état hydrique du sol en absence d'irrigation, montrant une baisse importante des réserves en eau au cours de la période de croissance des fruits.

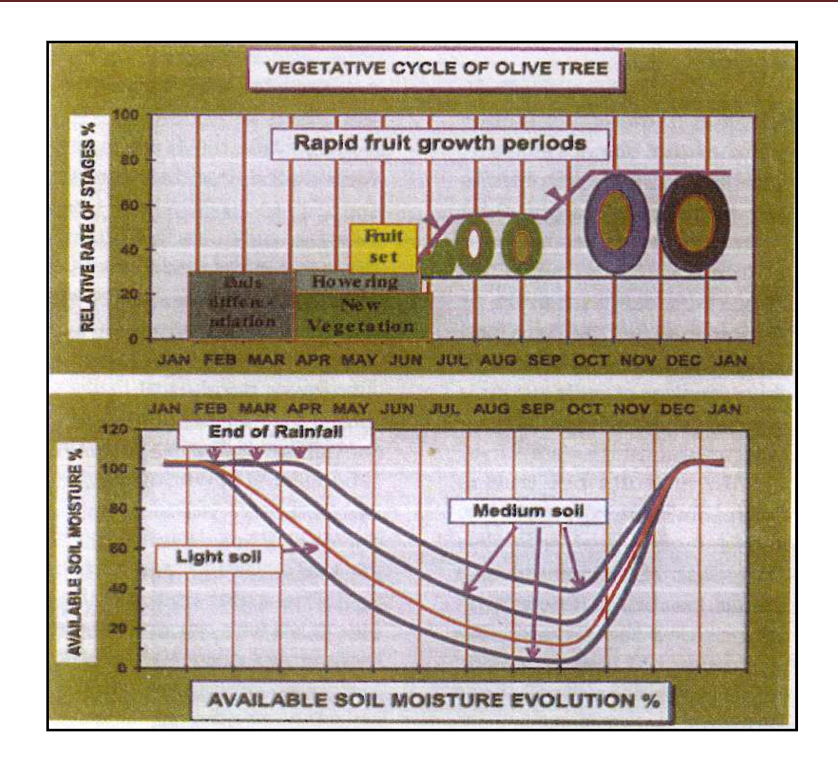


Fig.7. Stades de développement des olives et évolution de l'état hydrique du sol en absence d'irrigation **(Rallo, 1998).**

L'irrigation favorise la croissance estivale des pousses **(Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008)**, qui s'ajoutera à la croissance printanière et automnale. Ceci permettrait la différenciation d'un nombre plus élevé de sites de fructification.

L'olivier produit ses fruits sur les pousses formées l'année qui précède la floraison. Par conséquent il est nécessaire que **l'oliveraie soit irriguée aussi bien durant les années « moins » (année de faible charge en fruits) qu'en année « plus » (année de forte charge en olives).** Ainsi, l'oliveraie devra être irriguée de février à octobre pour couvrir successivement les processus de différenciation florale (février), la vague de croissance printanière (mars-fin avril), la nouaison des olives et le premier stade de leur développement (mai-juin), le stade de durcissement des noyaux des olives (fin juin), la vague de croissance estivale (juillet), les processus d'induction et d'initiation florale (août), la vague de croissance automnale et enfin le stade de grossissement ultime des olives et leur maturation (septembre-octobre).

NB: En été, il est conseillé d'irriguer la parcelle tôt le matin ou tard l'après midi pour éviter l'évaporation de l'eau au cours des heures de fort rayonnement. Durant la période de floraison, il est conseillé de réduire les apports d'eau.

5-Dose d'irrigation

La dose d'irrigation est la quantité d'eau à appliquer en vue de satisfaire les besoins en eau de la culture pour une période déterminée (jour, décade…). Elle est exprimée en millimètre d'eau, en m^3/ha ou en litre/arbre sachant que :

$$1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1 \text{ litre}/\text{m}^2$$

Pour convertir une dose en litre/arbre, la dose exprimée en millimètre est multipliée par la surface occupée par l'olivier en m^2. Cette surface est égale au produit des écartements.

La quantité d'eau à apporter par irrigation (I, mm) est définie par: $I\ (mm) = ET_c\ (mm) - P_e\ (mm)$

Avec P_e : la pluie efficace, *c.à.d.* la quantité de pluie utile et profitable à l'arbre.

Généralement, on prend P_e = 70% P avec P, la pluie relevée sur une période donnée, par exemple, mensuelle.

Pour plus de précision, P_e peut être déterminée de la manière suivante:

$P_e = 0{,}8\ P$ si $P > 75$ mm/mois,
$P_e = 0{,}6\ P$ si $P < 75$ mm/mois.

Les précipitations sont considérées comme inefficaces lorsqu'elles sont inférieures à 10 mm.

Application 8

Dose nette d'irrigation

L'irrigation doit être appliquée lorsque le pourcentage admissible (p) d'humidité disponible (S_a) est épuisé dans la profondeur d'enracinement, c.-à-d. quand elle doit réalimenter l'eau épuisée.

Par conséquent, la profondeur nette de la dose d'irrigation (d, mm) s'écrit:

$$d = (S_a \times p) \times D$$

Où:

S_a = humidité disponible (mm /m),
p = tarissement admissible (fraction),
D = profondeur d'enracinement (m).

Exemple:

Si S_a = 99 mm/m, p = 0,5, D = 0,4 m,

La dose d'irrigation nette qui compensera le déficit d'humidité sera de :

$$d = 99 \times 0{,}5 \times 0{,}4 = 19{,}8 \text{ mm.}$$

Application 9

Dose d'irrigation en goutte à goutte

Données:

Les besoins en eau de l'olivier adulte cultivé dans la région de Mornag durant la 3ème décade de juin s'élèvent à 18,6 mm (pour les 10 jours).

Question:

Quelle est la dose d'irrigation ?

Réponse:

Si on suppose que l'on a reçu 10 mm de pluie durant cette décade; les pluies utiles P_e sont de l'ordre de 7 mm (10 mm x 70% = 7 mm).

Par conséquent les besoins réels seront de (18,6 mm – 7 mm) = 11,6 mm soit 116 m^3 d'eau par hectare.

La dose journalière est de 11,6 mm/10 = 1,16 mm ou 11,6m^3/ha ou 41,7 l/arbre/jour si l'écartement entre les arbres est de 6mx6m (278 pieds/ha).

Sachant que l'efficience du système est de 90%, la dose sera de 1,16 mm : 0,9 = 1,29 mm/jour

Cette dose est à corriger en fonction des relevés tensiométriques.

Application 10

Périodicité des irrigations en micro-aspersion

Données:

Les besoins en eau de l'olivier adulte cultivé dans la région de Mornag durant la 3[ième] décade de juin s'élèvent à 18,6 mm (pour les 10 jours).

Question:

Si on suppose qu'aucune pluie n'a été enregistrée, quelle est la durée entre deux irrigations si la dose est fixée à 20 mm.

Réponse:

La consommation journalière prévisionnelle = 18,6 mm : 10 jours = 1,86 mm/jour

La durée entre deux irrigations = 20 mm x 85 % : 1,86 mm/jour = 9,1 jours.

Cette durée est à corriger en fonction des relevés tensiométriques.

Il s'agit du nombre de jours entre deux irrigations consécutives: $i = d/ET_c$,

Où :
d = la profondeur nette d'application de l'irrigation en mm (dose).
ET_c est l'évapotranspiration journalière de la culture en mm/jour.

Si d = 19,8 mm et ET_c = 2,5 mm/jour, i = 19,8 : 2,5 = 8 jours.

Source des données utilisées dans les applications pour le calcul des paramètres de l'irrigation: http://www.afidoltek.org/index.php/Les_besoins_en_eau_de_l'olivier.

6-Besoins en eau de lessivage

La quantité d'eau à apporter dépend des besoins de la culture et de la qualité de l'eau d'irrigation. Dans le cas des eaux saumâtres, il convient d'ajouter une fraction d'eau de lessivage des sels **(Application 11).** Un volume d'eau supplémentaire sera donc appliqué durant l'irrigation pour les besoins de lessivage, qui entrainera les sels en dehors de la zone des racines.

Les besoins de lessivage (BL, mm) sont intégrés dans le calcul de la dose nette d'irrigation. Ils sont exprimés en fonction de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation CE_i et de la valeur limite de la conductivité électrique pour l'olivier, qui est de l'ordre de 3 mmhos.

Application 11

Besoins en eau de lessivage (BL)

Données:

Conductivité électrique de l'eau d'irrigation, notée CEi = 3,8 mmhos / cm
Conductivité électrique limite pour l'olivier = 3 mmhos / cm

Question:

Quelle est la dose de lessivage ?

Réponse:

Les besoins en eaux de lessivage (BL, mm) sont exprimés par BL = $\underline{CE_i}$ / (5 CE_{limite} – CEi) x 1/E
Soit BL = (3,8 / 5x3 - 3,8) x 1/0,6 = 0,33 x 1,66 = 0,54 soit 54%

Il faut donc majorer les doses d'irrigation de 54%.

7- Efficience d'application de l'irrigation

Les efficiences relatives au matériel d'irrigation sont données dans le **tableau 11.**

Tableau 11. Efficience d'application de l'irrigation pour divers systèmes ou méthodes d'irrigation au niveau de l'exploitation.

Système/méthode	E_a %
Réseau de canal en terre, irrigation de surface	40-50
Réseau de canal revêtu, irrigation de surface	50-60
Réseau de conduites sous pression, irrigation de surface	65-75
Systèmes d'irrigation par tuyaux souples	70-80
Systèmes d'aspersion basse et moyenne pression	75
Micro-asperseurs, micro-jets, mini-asperseurs	75-85
Irrigation goutte-à-goutte	80-90

CEMAGREF (1990)

Application 12

Efficience d'application de l'irrigation

La quantité d'eau à stocker dans la zone des racines correspond à la dose nette d'irrigation (d). Toutefois, durant l'irrigation, des quantités importantes d'eau se perdent par évaporation, infiltration, percolation profonde, etc. La quantité perdue dépend de l'efficience du système.

L'efficience d'application de l'irrigation (E_a) s'exprime par: E_a = d / eau appliquée (brute) *100 où (d) est l'eau stockée dans la zone des racines.

Données:

La dose nette d'irrigation (d) pour une surface de 1 ha est de 19,8 mm, *c.-à-d.* 198 m^3.
Le volume d'eau distribué durant l'irrigation est de 280 m^3.

Question :

Quelle est l'efficience d'application ?
Quantité d'eau perdue ?

Réponse:

E_a = 198 / 280 = 0,70.

Les 30% restants de l'eau appliquée sont considérés comme perdus.

8-Résultats de quelques essais conduits en Tunisie: doses appliquées et productivités

Le tableau ci-dessous présente des valeurs de l'EUE obtenues en Tunisie sous différentes conditions culturales.

Tableau 12. Efficiences de l'utilisation de l'eau obtenues en Tunisie sous différentes conditions de culture.

Lieu	Quantité d'eau m^3/ha	Surface m^2/arbre	$Q^{té}$ d'eau m^3/arbre	Production Kg/arbre	EUE Kg d'olives/m^3
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,94 (CEE)	13000	36	47	24,27	0,52
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,60 (CEE)	8300	36	30	24,4	0,85
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,40 (CEE)	5700	36	20	23,5	1,17
P=250 mm I=370 mm	6200	61	38	29	0,77
Olivier pluvial (Tunis)	4500	144	65	30	0,50
Enfidha	3800	256	97	50	0,50
Sfax terre très légère	1700	576	100	42	0,42
Sfax terre légère	1900	576	112	44	0,39
Sfax sous sol lourd salé	1600	576	94	24	0,25
Sfax culture intensive	1900	345	66	23	0,35

Vernet et al., (1970).

La meilleure efficience d'utilisation de l'eau pour des oliviers Chétoui conduits en intensif dans le Nord de la Tunisie est de 1,17 kg d'olives par m^3 d'eau apporté.

FICHE TECHNIQUE D'UTILISATION

IRRIGATION GOUTTE A GOUTTE DE L'OLIVIER
(EXEMPLE DE CALCUL POUR LE MOIS DE POINTE)

Culture adulte (K_c = 0,7 et K_r = 0,75)	Olivier
Distance entre les lignes	8 m
Distance entre les pieds	6 m
Surface vitale d'un plant	48 m^2
Nature du sol	Limono-sableux
Besoin mensuel en eau ET_c pour juillet (ET_o Juillet = 180 mm)	90 mm
Distance entre conduites goutte à goutte	8 m
Distance entre goutteurs	1 m
Surface utile couverte par goutteur	8 m^2
Débit d'un goutteur	4 l/h
Pluviométrie horaire (mm)	0,50
Nombre d'heures pour une application de 90 mm/mois	180h
Nombre d'heures par mois	720 h
Rapport entre heures d'irrigation et heures de repos	1/3
Intervalle entre deux passages	2j
Durée d'irrigation par passage (12h x 15 passages / mois x 0,5 mm = 90 mm/mois)	12 h
Pluviométrie par passage	6mm
Nombre de goutteurs par ha	1250
Débit horaire par ha	5m^3/h/ha

SOMIVAC (1982).

Chapitre 8

CONSOMMATION EN EAU DE L'OLIVIER MESURES PHYSIOLOGIQUES

1-Consommation en eau de l'olivier

La consommation réelle en eau de la culture, notée ET_r (ou ET_a: Actual evapotranspiration), est la quantité d'eau réellement absorbée par la culture au cours d'une période donnée. Elle est généralement inférieure à l'ET_c et dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels, l'écartement entre les arbres et le taux de couverture du sol par la végétation **(Cruz Conde et Fuentes, 1989)** comme le montre le **Tableau 13** où la consommation en eau est rapportée à l'arbre, pris en tant qu'individu et exprimée en terme litres l'eau transpirés par pied et par jour.

Tableau 13. Transpiration (T) de l'olivier Picual en fonction de la densité de plantation. Valeurs observées sur de jeunes oliviers bien développés cultivés à Cordoue, Espagne.

Nombre d'oliviers/ha (Densité)	Pourcentage de couverture du sol	T_{max} (litre/pied/jour)	Dose à apporter (mm/jour)	T_{max} / ETP
100 (10m x 10m)	25	135	1,35	0,25
150 (8m x 8m)	36	103	1,53	0,29
200 (7m x 7m)	40	85	1,70	0,32
250 (6m x 7m)	43	73	1,82	0,34
300 (6m x 6m)	45	65	1,95	0,36
400 (5m x 5m)	50	54	2,16	0,40

NB: Valeur moyenne transpirée par olivier jeune durant la période juin-août: 0,35 litre/m^2 de feuille. Evaporation bac A de 6,6 mm et ETP-Thorntwhite de 5,4 mm. ETP (avril-octobre): 820 mm **(Cruz Conde et Fuentes, 1989)**.

Ce tableau montre que lorsque le nombre de pieds/ha augmente de 100 à 400 pieds/ha, le pourcentage de couverture du sol augmente de 25% à 50%. Par contre, la valeur journalière de la transpiration maximale (T_{max}) diminue de 135 à 54 litres/pied alors que le rapport T_{max}/ ETP augment de 0,25 à 0,40. Ce rapport peut être considéré comme étant le coefficient cultural K_c en dehors des périodes où le sol est humecté en surface.

Les valeurs de l'ET_r ne représentent pas les quantités d'eau à apporter par l'irrigation. Des coefficients de majoration liés à l'efficience du système d'irrigation doivent être appliqués en fonction du système d'irrigation, tel que :

- pour le goutte-à-goutte: 1 / 0,9 (efficience du système de 90 %).
- pour la micro-aspersion: 1 / 0,85 (efficience du système de 85 %).

2-Mécanisme de fonctionnement

« La transpiration est un processus évaporatoire par lequel l'eau s'échappe de la plante à travers les stomates des feuilles vers l'atmosphère sous l'effet de la demande climatique ». Au lever du soleil, la lumière provoque l'ouverture des stomates des feuilles. La plante commence à transpirer en régulant son rythme en fonction de l'importance de la demande climatique et atteint son maximum environ une heure après le passage du soleil au zénith (midi solaire). Lorsque l'eau est disponible au niveau du sol, les quantités transpirées quotidiennement par la plante sont voisines de celles qui sont absorbées par les racines **(Cruiziat et Tyree, 1990 ; Clothier et Green, 1994).** Par conséquent, le flux d'eau traversant la plante peut être considéré comme conservatif (absorption = transpiration) et dans ce cas, la mesure du flux de la sève brute peut fournir une estimation précise de la consommation en eau du végétal mais dans un système de culture discontinu (arbre pris en tant qu'individu) et à une échelle de temps réduite. Il est possible alors de séparer les flux évaporatoires de la plante (transpiration) et du sol (évaporation), qu'il soit couvert ou non par une végétation secondaire.

3- Mesure du flux de la sève xylémique

3-1-Techniques de mesures du flux de la sève brute

Le concept de mesure du flux de la sève a été développé par **Huber (1932)-cité par Swanson (1994)-.** Il est basé sur le fait que le passage de la sève dans les tissus conducteurs de la tige perturbe sensiblement la diffusion de la chaleur dans ces tissus. Ces variations peuvent être mesurées et exprimées en termes de flux. Depuis ce premier modèle, plusieurs techniques ont été développées et utilisées **(Nasr, 1987 ; Cabibel, 1991 ; Cabibel et Do, 1991 a et b ; Cohen, 1991 ; Cabibel et Isbérie, 1997 ; Do *et al.*, 1998 ; Fernandez *et al.*, 2001 ; Granier, 1985 et 1987 ; Green, 1988 et 1993 ; Granier *et al.*, 1996 ; Masmoudi *et al.*, 2004 b; Moreno *et al.*, 1996 ; Do et Rocheteau, 2003).** Ces techniques, bien qu'elles diffèrent selon le paramètre mesuré (temps ou écart de temps), la complexité de l'équipement, le coût de l'installation et le domaine d'application **(Smith et Allen, 1996),** utilisent toutes la chaleur comme traceur thermique et qui est diffusée soit par impulsion soit par dissipation de l'onde de chaleur. Il existe trois principaux groupes: (1) les méthodes basées sur la vitesse de transfert d'une impulsion de chaleur, (2) celles qui analysent le bilan d'énergie en présence d'une source de chaleur continue ou (3) les méthodes basées sur l'observation de la variation de la température au voisinage d'une source de chaleur connue. Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes dépend de l'objectif du travail et du type de matériel végétal utilisé **(Swanson, 1994).**

3-1-1-Méthodes par impulsion de la chaleur

Le système est constitué par une sonde unique, chauffante, placée à la surface du rameau et en amont d'un thermocouple. La méthode consiste à déterminer le temps au bout duquel une brève impulsion de chaleur émise par un élément chauffant atteint un point situé à une distance connue en aval de la sonde chauffante **(Swanson 1994).** Ce temps de transport est égal à celui qui est mis par la sève pour atteindre le point de mesure en supposant que la chaleur est transportée totalement par convection. Cette méthode a été utilisée sur Vitis vinifera **(Yunusa *et al.*, 2000-cités par Abid-Karray, 2006),** Pinus radiata **(Teskey et Sheriff, 1996-cités par Abid-Karray, 2006)** et Olea europaea **(Moreno et al., 1996 ; Fernandez et Moreno, 1999 ; Palomo *et al.*, 1998).** Elle exprime le flux de la sève en fonction de la vitesse d'impulsion de la chaleur et de la diffusivité thermique du bois.

L'avantage de la technique est son faible coût énergétique et d'investissement. Elle permet de mesurer des débits supérieurs à 60 cm/h mais elle ne convient pas aux faibles débits en raison de sa sensibilité aux gradients thermiques **(Swanson, 1994).** Son inconvénient majeur est la ponctualité des mesures qui diminue la précision de la technique et augmente la variabilité entre les observations. Il est donc nécessaire de multiplier les points de mesures en considérant différentes profondeurs dans le xylème et plusieurs directions.

3-1-2-Méthode de bilan de chaleur

Développée par **Daum (1967)-cité par Nasr (1987)-**, cette méthode ne fut utilisée sur la totalité de la section du tronc qu'en 1979 par **Sakuratani (Sakuratani, 1979-cité par Nasr 1987-).** Par la suite, les travaux se sont multipliés sur différentes espèces **(Massai *et al.*, 2000 ; Nasr, 1987),** notamment sur jeunes oliviers **(Dichio *et al.*, 1998-cités par Fernandez et Moreno, 1999-).**

La méthode consiste à appliquer une quantité de chaleur de manière continue au niveau d'une section du tronc, à estimer les flux de chaleur conductifs sur la portion chauffée et à déduire les flux convectifs liés au déplacement de la sève et qui sont proportionnels au débit d'eau **(Nasr, 1987).** Elle est applicable sur des sections de faible diamètre (moins de 15 cm).

3-1-3-Méthodes de dissipation de la chaleur

Cette méthode a été développée par **Granier (1985, 1987 a et b).** Elle consiste à mesurer au niveau des vaisseaux conducteurs de la sève brute, l'écart de température qui est crée entre une sonde de référence et une sonde chauffante suite à la dissipation, par convection, d'une onde de chaleur. La différence de température obtenue est maximale pour un débit de sève nul et diminue lorsque la vitesse du flux de la sève augmente suite à la dissipation d'une quantité de plus en plus élevée de la chaleur, produite par la sonde chauffante.

Les résultats obtenus sur différentes espèces forestières et fruitières sont cohérents aux mesures de potentiel hydrique foliaire sur pin **(Loustau *et al.*, 1990)** et aux mesures gravimétriques effectuées sur Manguier (Mangifera indica). De bonnes corrélations ont été également obtenues entre les mesures du flux de la sève et l'évapotranspiration de référence notamment chez le bananier et l'olivier **(Moreno *et al.*, 1996 ; Fernandez *et al.*, 2001 ; Lu *et al.*, 2004).**

La méthode s'adapte à une large gamme d'espèces et de matériel végétal. Elle permet d'effectuer des mesures sur une longue période allant jusqu'à deux saisons de culture **(Lu *et al.*, 2004).** L'installation de l'équipement est simple, requiert une faible puissance de fonctionnement avec un coût relativement réduit. Cependant, le caractère individuel de la mesure pose un problème au moment de l'extrapolation des résultats à l'ensemble de la parcelle. Il peut en résulte des erreurs d'estimation des flux **(Kostner *et al.*, 1998).** Le passage de l'individu au couvert végétal utilise des paramètres caractéristiques de la végétation telle que la densité de plantation, l'indice foliaire ou la surface du rameau conductrice de l'eau, qu'il faut déterminer spécifiquement pour chaque cas **(Granier *et al.*, 2000 ; Rana et Katerji, 2000).**

3-2- Procédure de calcul

La procédure de **Do et Rocheteau (2002 a et b)** est utilisée pour traduire les 'signaux' émis par les capteurs en densité de flux horaire F_d (litre de sève qui transite en une heure à travers une section de rameau de 1 dm^2, $l/h/dm^2$), définie par :

$$F_d = (11{,}3\ K\ /\ 1\text{-}K)^{0{,}707}$$

K est l'indice du flux, paramètre sans dimension, déterminé à partir de ΔT_a et ΔT_{max} où ΔT_{max} est la valeur maximale de la différence de température. Elle est généralement observée avant l'aube et est mesurée à flux nul. K est défini par :

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T_a) / \Delta T_a$$

ΔT_a est exprimée par :

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off}$$

ΔT_{on} et ΔT_{off} représentent respectivement la différence de température enregistrée à la fin de la période de chauffage et celle qui est mesurée à la fin de la période de non chauffage.

L'indice de flux K a été déterminé expérimentalement par **Granier (1985)** pour différentes espèces forestières à partir de mesures simultanées de l'exsudat issu de portions de rameaux et le signal donné par le capteur thermique. Le flux total (F, l/h) traversant le tronc est le produit des valeurs journalières de F_d par la section transversale du bois d'aubier conductrice de l'eau (S_c, dm^2) telle que :

$$F = F_d \times S_c$$

Le flux moyen de la parcelle (litre/jour) est déterminé en calculant la moyenne arithmétique des flux en considérant l'ensemble des capteurs et des arbres (n) tel que :

$$T_a = \Sigma F_i\ /\ n$$

La transpiration (T, mm) de l'oliveraie est exprimée en fonction de T_a et de la surface occupée par chaque olivier (S_u, m^2) :

$$T = T_a / S_u$$

3-3- Dispositif de mesures du flux de la sève brute

Les capteurs sont constitués de deux sondes. La sonde amont (placée en bas) donne la température de référence ($T_{réf}$) alors que la sonde aval (placée en haut du tronc) est équipée d'un élément chauffant qui fonctionne à puissance constante, moyennant un chauffage intermittent qui permet de tenir compte de l'effet du graduant naturel. La chaleur diffuse à travers le bois et la sève par le passage de la sève et induit une différence de température entre les deux sondes. Le système est alimenté par une batterie reliée à un panneau solaire qui assure sa recharge. Les signaux émis par les capteurs sont enregistrés au niveau d'une centrale d'acquisition des données. Ce dispositif est illustré par la **figure 8 (Lu *et al.,* 2004).**

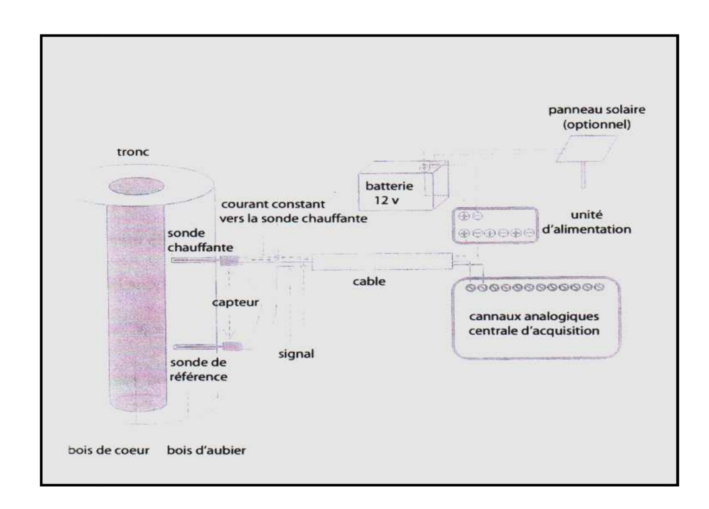


Fig.8. Schéma du dispositif de mesure du flux de la sève brute.
(Lu *et al.*, 2004).

L'application n°13 est un exemple dans lequel la méthode de dissipation de l'onde de chaleur a été utilisée pour estimer la consommation en eau de jeunes oliviers Chétoui **(Mahjoub, 2004 ; Masmoudi *et al.*, 2004 b ; Masmoudi-Charfi, 2008 ; Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011)**.

Application 13

Travaux de recherches menés en Tunisie

Détermination de la consommation en eau de jeunes oliviers Chétoui par la mesure du flux de la sève brute

a- Site et Objectif

L'étude a été réalisée à Mornag sur de jeunes oliviers de la variété Chétoui plantés à la densité de 278 pieds/ha et conduits sous irrigation de complément dans le but d'estimer leur consommation en eau. La méthode de dissipation de l'onde de chaleur **(Granier, 1985, 1987a, 1987b)** a été utilisée. Les relations entre les mesures de flux, la demande climatique et l'état hydrique du sol ont été étudiées. Un ordre de grandeur de la transpiration de l'arbre est avancé. Les étapes du travail sont les suivantes:

b- Installation des capteurs au champ

Des capteurs thermiques type Granier ont été insérés radialement sous l'écorce du tronc de trois oliviers Chétoui à 40 cm au dessus du niveau du sol, selon différentes orientations **(Photo 12)**. L'électronique nécessaire pour l'alimentation des capteurs et l'enregistrement des données a été développée localement **(Masmoudi *et al.*, 2004 b).** Les capteurs ont été chauffés par intermittence de 30 mn de chauffage / 30 mn de non – chauffage et fonctionnant avec une puissance constante (10 ohms/0,2Watt). Une batterie de 12V (20 mA) a été utilisée à cet égard.

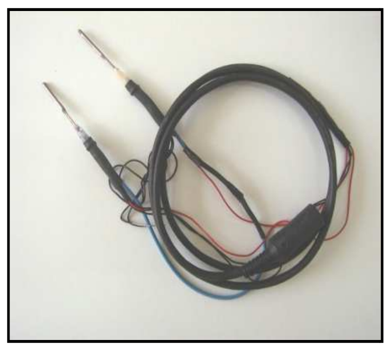






Photo 12. A gauche : Capteur de flux de sève constitué de deux sondes (sonde chauffante et sonde de référence). Au milieu : Capteur installé sous l'écorce du tronc d'olivier Chétoui âgé de six ans. Les deux sondes du capteur sont décalées l'une par rapport à l'autre pour éviter les interférences. La sonde aval (haut) est chauffante. A droite : Capteurs enveloppés par un film en aluminium isotherme pour éviter leur réchauffement par le rayonnement réfléchi.

c- Mesures et procédure de calcul

Les signaux émis par le capteur ont été enregistrés sous forme physique (mV) au niveau d'une centrale d'acquisition de données DL2 (data logger Delta-T Devices, co.uk), puis traduits en densité de flux horaire F_d selon la procédure de **Do et Rocheteau (2002 a et b)**. Les valeurs de flux F sont obtenues après étalonnage des capteurs et détermination de la section transversale du bois d'aubier conductrice de l'eau ($S_{c,}$ dm^2).

d- Etalonnage des capteurs de flux utilisés dans l'expérimentation

L'étalonnage des capteurs consiste à établir une relation entre la densité de flux et l'indice de flux K. L'expérimentation a été réalisée sur une portion fraiche d'un rameau d'olivier Chétoui de 5 cm de diamètre et de 40 cm de long au niveau duquel ont été insérés plusieurs capteurs thermiques, fonctionnant sous différentes pressions de l'eau et puissances de chauffage ($\mathcal{P}$). **(Photo 13).**Le principe consiste à faire passer de l'eau javellisée sous pression (0-4 bars) au niveau de la portion de ce rameau et de déterminer d'une part le poids de l'eau qui s'y écoule et d'autre part la mesure du signal correspondant, converti en densité de flux.

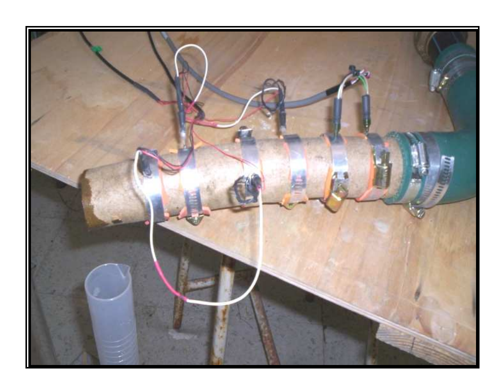


Photo 13. Dispositif d'étalonnage des capteurs de mesure du flux de la sève
(Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).

Les résultats ont montré que la densité de flux dépend de la puissance de chauffage des capteurs **(Fig.9)**. Lorsque la puissance de chauffage augmente, les valeurs de F_d diminuent pour une même valeur de K. Cette relation est ci-dessous explicitée pour différentes valeurs de $\mathcal{P}$.

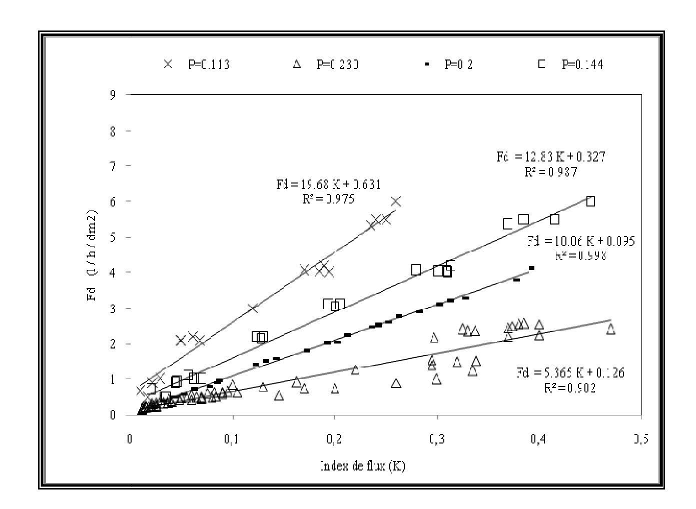


Fig.9. Relation entre la densité de flux (F_d, l/h/dm^2) et l'indice de flux K pour différentes puissances de chauffage (Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).

Le paramètre (a) tel que définit dans l'équation de Do et Rocheteau (2002 a et b) s'exprime en fonction de la puissance de chauffage par :

$$a = 180{,}74 e^{-15.23\,\mathcal{P}} \qquad \text{avec} \quad r=0{,}969$$

Lorsque $\mathcal{P}$ augmente de 0,113 à 0,230 W, les valeurs de (a) diminuent de 35 à 5.

e- Section du rameau conductrice de l'eau.

La section conductrice de l'eau S_c a été déterminée par coloration spécifique en utilisant la *Safranine Orange* et des portions de rameaux de diamètre allant de 1 à 12 cm. Le principe consiste à simuler l'appel de transpiration au moyen d'une pompe à vide durant une période donnée, ce qui permet la montée de l'eau colorée dans la portion de rameau et sa coloration (Photo 14).



Photo 14. Dispositif expérimental conçu pour la détermination de la section du bois conducteur de l'eau (Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).

Après coloration, des observations anatomiques ont été réalisées sur des rondelles de bois finement et fraîchement coupées à main levée. La section totale de la portion du rameau ainsi que celles des différentes zones colorées au niveau de chaque section ont été déterminées au moyen du *logiciel Arcview*. Au niveau des coupes, une hétérogénéité de la coloration est observée **(Photo 15)**. Elle est due à la présence de différentes structures. Sur des coupes bien colorées, la moelle apparaît en blanc alors que le bois conducteur est coloré en rouge sang. L'écorce conserve sa couleur verte-brune.

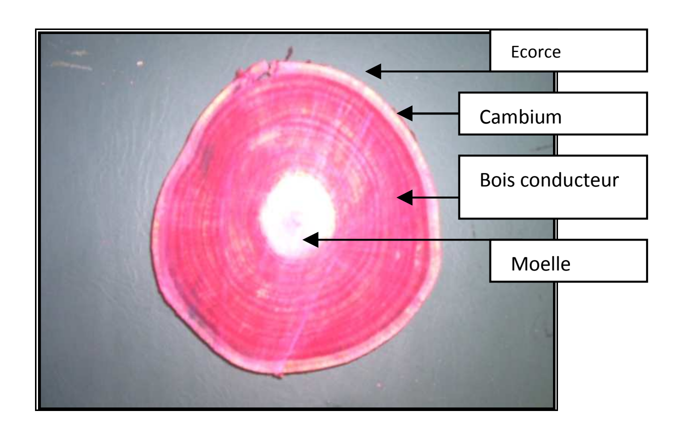


Photo 15. Coupe transversale d'un rameau d'olivier de 5 cm de diamètre après coloration à la Safranine Orange. De l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce colorée en vert brun, le bois conducteur en rouge avec alternance de cernes claires et foncées et la moelle, au centre, claire. Le cambium est représenté par un anneau interrompu, couleur rouge foncé, placé entre l'écorce et le bois conducteur **(Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).**

La section totale du rameau (cm^2) d'olivier est étroitement corrélée avec la section du bois conducteur de la sève (S_c, cm^2) pour des rameaux de diamètres allant de 1 à 12 cm **(Fig.10).**

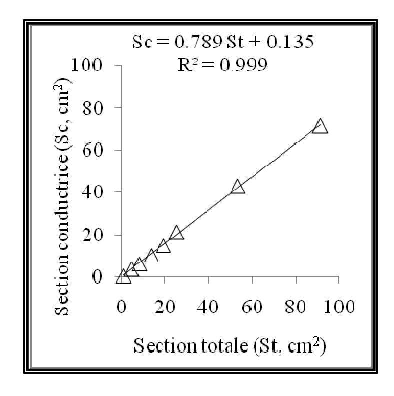


Fig.10. Relation entre la section totale du rameau (cm^2) d'olivier et la section du bois conducteur de la sève (cm^2).

Cette corrélation est exprimée par : $S_c = 0,798\ S_t + 0,2383$ avec $r = 0,99$

f- Evolution de la densité de flux et ses facteurs de variations

- Signaux émis par les capteurs

Au cours d'un cycle de chauffage, les signaux évoluent différemment pendant les heures diurnes et nocturnes. Ils sont plus faibles le jour que ce soit pour les valeurs maximales ou minimales. La nuit, les signaux n'atteignent pas de palier ni en phase de chauffage ni au cours du refroidissement, mais une valeur maximale variant de 0,20 à 0,27 mV ou minimale proche de zéro. Pendant la journée, les signaux atteignent rapidement les valeurs d'équilibre V_{on} et V_{off} avec un maximum de 0,15 mV et un minimum pratiquement nul ou négatif (Fig.11). La transition entre le régime nocturne et diurne est rapide. Le palier est établi au bout du 3ème cycle que ce soit à l'aube ou à l'aurore.

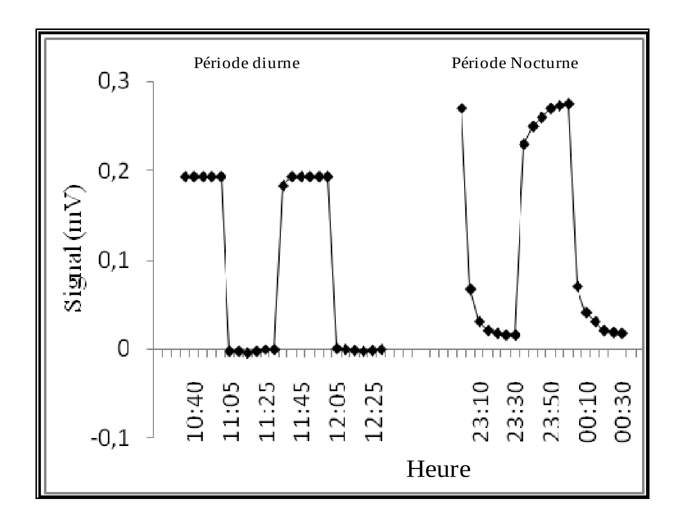


Fig.11. Variation des signaux émis par les capteurs (mV) au cours d'un cycle de chauffage (Masmoudi-Charfi *et al.,* 2011).

Cette dynamique résulte de la variation de l'écart de température entre les sondes du capteur. En absence de flux transpiratoire la nuit, la différence de température est maximale entre la sonde chauffée et la sonde de référence. Pendant les heures diurnes, le passage du flux de sève sous l'effet de la demande climatique tend à homogénéiser le milieu sève - bois, réduisant ainsi l'écart de température entre les deux sondes ; c'est ce qui explique la baisse des signaux au cours de la journée et l'établissement des paliers. Le cycle de 30 mn de chauffage et de 30 mn de non chauffage parait convenable malgré le nombre d'observations limité.

- Densité de flux

La figure 12 est un exemple type de l'évolution journalière de la densité de flux de la sève. Elle montre une évolution synchrone des valeurs de F_d avec R_g.

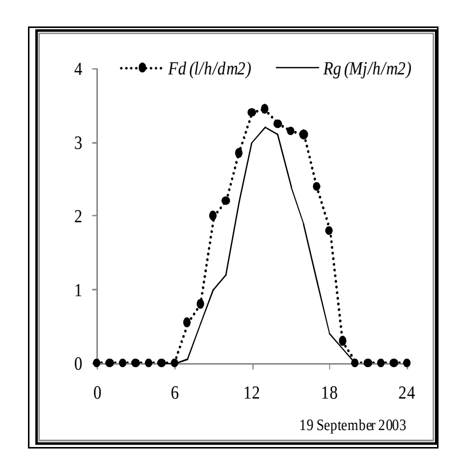


Fig.12. Evolution de la densité de flux de sève (l/h/dm^2) et du rayonnement global (Mj/h/m^2) au cours d'une journée d'automne **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

A la levée du jour, F_d augmente rapidement pour piquer aux alentours du midi solaire. Le rayonnement global commence à décliner à partir de 13 h alors que les valeurs de F_d commencent à diminuer à partir de 15 h. Au-delà de 18 h, F_d diminue rapidement et s'annule vers 21h.

g-Variation de F_d en fonction de l'état hydrique du sol et de la demande climatique

Les valeurs de F_d varient en fonction de la demande climatique et l'état hydrique du sol comme le montre les **figures 13 et 14.** En automne et sous de bonnes conditions d'alimentation hydrique (humidité du sol supérieure à 30%) et une demande évaporatoire modérée (exemple de la journée du 19/9, ET_0 = 3,7 mm/jour, $T_{max.}$= 28°C et $T_{min.}$= 19°C), les variations de F_d suivent de près celles de R_g atteignant un maximum de 3,45 l/h/dm^2 pour R_g de l'ordre de 3,2 Mj/h/m^2 **(fig.14).** En période de pluie, F_d diminue considérablement suite à la baisse significative du rayonnement. L'exemple illustratif de la **figure 13** (17 Octobre 2003) montre que pour ET_0 de 1,4 mm, T_{max} = 25° et T_{min} = 19°C et R_g = 1,0 Mj/h/m^2, F_d maximal est de 1,9 l/h/dm^2. Au cours des mois d'été (juin-août), F_d augmente avec l'augmentation de R_g mais son augmentation reste tributaire des conditions hydriques. En absence d'irrigation (exemple du 22/6 avec ET_0 = 6,8 mm/jour, T_{max} = 35°C et T_{min} = 20°C), F_d augmente juste après le levé du soleil et atteint dès les premières heures matinales des valeurs limites qui sont maintenues pendant 10-12 h alors que R_g continue d'augmenter. Sous irrigation, les valeurs de F_d n'augmentent pas systématiquement avec l'apport de l'eau. Des augmentations ponctuelles sont toutefois observées une heure après l'irrigation, par exemple au cours de la journée du 10/8 (ET_0 = 5,7 mm, T_{max} = 35°C et T_{min} = 24°C) avec une valeur maximale de 3,3 l/h/dm^2. La présence du plateau est expliquée par la fermeture partielle des stomates, qui se produit lorsque le système radiculaire ne parvient plus à subvenir aux besoins en eau de la plante. Cette relation est explicitée par la **figure 15** qui montre que F_d est étroitement liée à la demande climatique avec des coefficients de corrélations qui varient de 0,941 à 0,980 en fonction de l'état hydrique du sol.

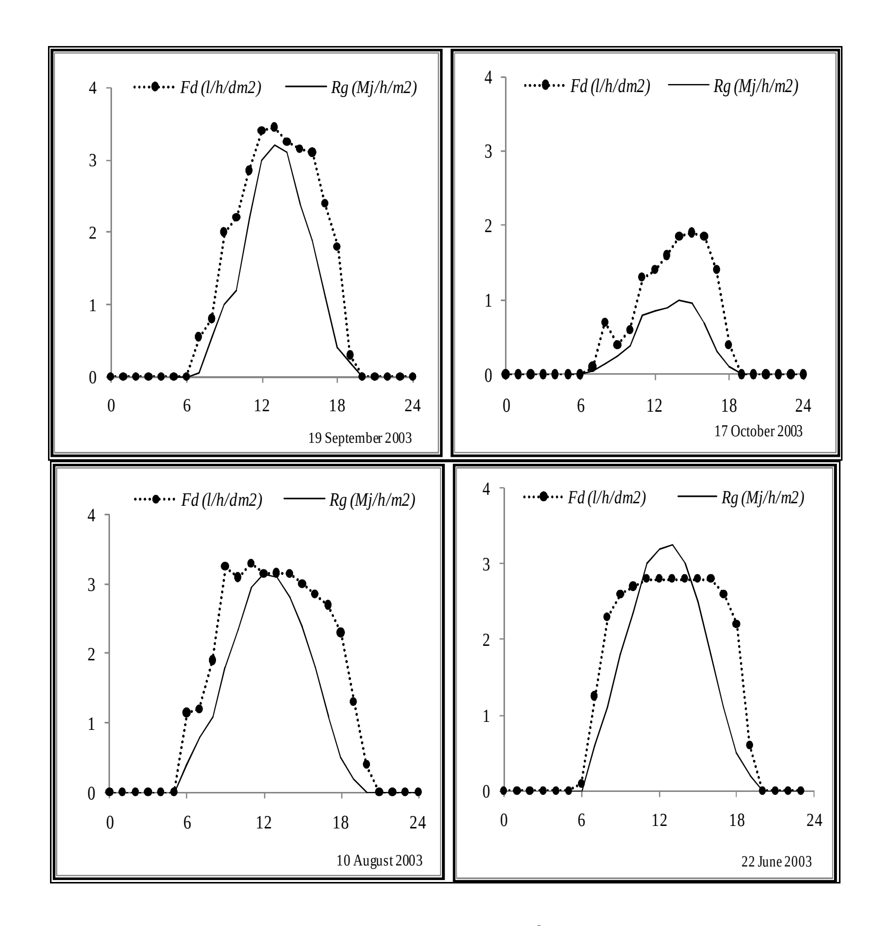


Fig.13. Evolution de la densité de flux de sève (l/h/dm^2) en fonction de l'état hydrique du sol et de la demande climatique au cours de la campagne 2003. Les journées choisies sont caractérisées par (1) des conditions climatiques modérées (19/9), (2) une demande climatique élevée (10/8), (3) un manque d'eau accompagné du vent de sirocco (22/6) et (4) une demande climatique faible avec pluie (17/10). **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

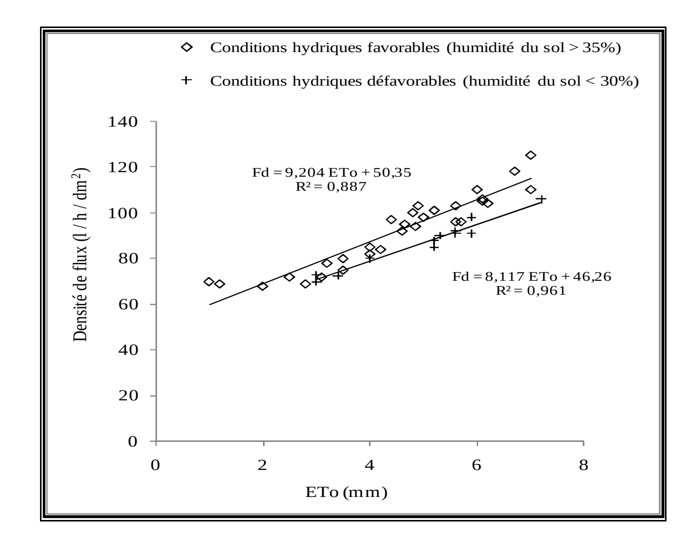


Fig.14. Densité de flux moyenne (l/h/dm^2) mesurée pendant une journée ensoleillée (26/7/003) sous différents états hydriques du sol **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

Les résultats montrent que le flux de sève mesuré au niveau du tronc est synchrone à la demande climatique, mais son augmentation atteint une valeur seuil au-delà de laquelle l'intensité de flux est d'autant moins proportionnelle à l'évapotranspiration que celle-ci augmente. Matériellement ceci se traduit par une stabilisation des valeurs de flux au milieu de la journée alors que R_g continue à augmenter, montrant que des mécanismes de régulation internes sont mis en jeu en vue de limiter la consommation hydrique de l'arbre.

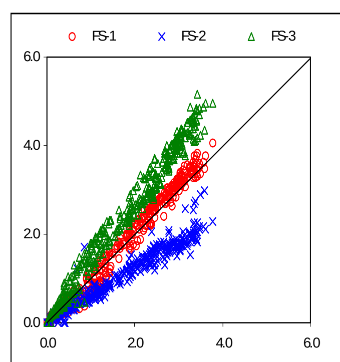
Ces résultats concordent avec ceux de **Abid-Karray (2006)** qui a observé que la densité de flux de la sève en condition de bonne alimentation hydrique suit celle de R_g avec un maximum variant de 1,9 à 3,0 $l/h/dm^2$ pour des rayonnements globaux maximums variant de 94 à 223 $J/h/dm^2$ et des valeurs de déficit de saturation de l'air allant de 1,48 à 0,44 KPa. La baisse de la densité de flux vers 14 h coïncide avec le maximum de déficit de saturation de l'air. En présence de sirocco, l'évolution du flux de la sève présente la même allure avec des valeurs de flux nettement plus élevées en dépit de valeurs de rayonnement global comparables. Cette augmentation est liée à l'effet advectif du sirocco. Au cours d'une journée pluvieuse, le rayonnement global présente des fluctuations liées au passage des nuages. Les valeurs de flux peuvent présenter une course différée par rapport au rayonnement global qui serait attribuée au temps nécessaire pour l'évaporation de la pluie interceptée par le feuillage. Pour une demande climatique faible ou nulle, le flux de sève décroît et peut s'annuler. Les flux nocturnes sont présents lors d'une séquence de forte évapotranspiration journalière. Néanmoins, ils peuvent trouver leur origine dans la reconstitution des réserves en eau de la canopée et du tronc qui ont contribué à la satisfaction de la demande évaporatoire diurne.

D'un autre côté, des observations réalisées par **Abid-Karray (2006)** sur des oliviers de la variété Chemlali cultivés à Kairouan et soumis à une irrigation complémentaire estivale, ont montré que l'apport de l'eau génère dans la plupart des cas une augmentation du rapport des densités de flux mesurées au niveau deux capteurs. Les valeurs obtenues au niveau des capteurs orientés N et SO sont de 1,42 avant l'apport de l'eau et 2,22 après l'irrigation. Pour l'orientation SE ce rapport reste constant. Cette variabilité trouve son origine dans l'hétérogénéité du système de conduction de l'eau. Les capteurs insérés au niveau des vaisseaux conducteurs peuvent être reliés au même vaisseau radiculaire ou à un vaisseau différent qui se trouverait soit dans la zone humectée par l'eau d'irrigation soit en dehors de celle-ci. De ce fait la réponse de ces capteurs à l'apport hydrique peut être différente. Par contre si ces deux capteurs sont reliés au même vaisseau radiculaire, la variation du rapport des densités de flux sera plus faible.

Quant aux relations reliant la demande climatique à l'utilisation de l'eau, les résultats explicités par la **figure 15** concordent avec ceux de **Giorgio et D'Andria (2002)** qui ont trouvé une étroite corrélation entre ET_0 et la transpiration chez l'olivier Kalamata cultivé en pluvial et en irrigué avec une consommation en verger allant de 9 à 22 l/arbre/jour pour ET_0 de 5 mm/jour. De leur côté, **Granier *et al.*, (1996), Moneno *et al.*, (1996)** et **Cabibel et Isbérie (1997)** ont observé une bonne corrélation entre les mesures directes de la transpiration et les valeurs déterminées par l'équation de Penman-Monteith (PM). Un écart entre les valeurs est observé dès les premières heures matinales (9-10 h) chez les arbres non irrigués et qui augmente au cours de la journée. Le maximum de flux est mesuré vers 15 h pour la racine et 16 h au niveau du tronc. Les résultats ont également montré que l'évapotranspiration de référence présente une meilleure relation avec le flux de sève quotidien car elle intègre l'influence de facteurs climatiques, autres que le rayonnement global.

h-Variation de la densité de flux en fonction de l'emplacement du capteur

L'évolution de la densité de flux produite par un capteur, tracée en fonction du flux moyen de l'arbre est présentée dans la **figure 15**.



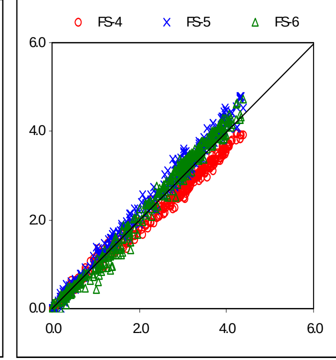


Fig.15. Relation entre la densité de flux horaire (l/dm^2/h) enregistrée par un capteur et la moyenne des mesures. Les groupes de capteurs (FS1, FS4), (FS2, FS5) et (FS3, FS6) sont orientés respectivement N, SE et SO. Les mesures correspondent à une trentaine de jours répartis sur toute l'année caractérisés par un bon état hydrique du sol **(Masmoudi-Charfi, 2008).**

La comparaison des tracés montre que pour une même orientation (par exemple FS1, FS4 orientés tous les deux Nord), les valeurs de flux peuvent se confondre avec la 1^{ière} bissectrice ou s'écarter de celle-ci **(Fig.16).** Les valeurs maximales de l'arbre 1 ont été observées au niveau du capteur FS3 orienté SO alors qu'au niveau de l'arbre 2 les densités de flux sont très proches. Ces résultats montrent que certains capteurs surestiment la densité de flux alors que d'autres la sous-estiment. Ils concordent avec ceux obtenus par **Abid-Karray (2006)** sur olivier Chemlali, qui a donné un flux maximal compris entre 20 et 80 l/dm^2/jour selon le capteur.

Ces différences mettent en évidence l'hétérogénéité du flux dans la section du bois mais qui ne serait pas nécessairement due à l'orientation. En effet, la comparaison des différentes orientations a montré que le poids relatif d'une direction donnée diffère selon les arbres et que la répartition directionnelle de la densité du flux est plutôt aléatoire. Elle serait due à la variabilité de la conductivité de la sève dans la section du tronc qui semble être liée à la nature de la connexion des vaisseaux du xylème avec la partie aérienne. Cette hypothèse a été vérifiée sur les coupes anatomiques colorées à la safranine, montrant une variabilité de l'intensité de la coloration, témoin de l'hétérogénéité du tissu conducteur de la sève brute. Ces résultats corroborent ceux de **Nicolas *et al.*, (2005)** qui attribuent la similarité des valeurs de flux obtenues pour les orientations Nord et Sud à une uniformité de distribution des vaisseaux conducteurs. Dans le même sens, **Granier (1987 a et b)** observe sur le Douglas des variations azimutales du flux au cours des journées à forte demande climatique et une homogénéité des mesures du flux entre les orientations NO, NE et S pour les journées où cette demande a été faible. Ces variations confirment l'existence d'une hétérogénéité des transferts de l'eau dans le bois. La sectorisation des échanges hydriques permet d'expliquer en partie cette hétérogénéité. Dans les cas les plus marqués un secteur déterminé communiquerait d'une part avec une portion de la couronne de l'arbre et d'autre part avec une racine ou un faisceau radiculaire **(Connor et Fereres, 2005).**

i- Evolution de la densité de flux journalier au cours de l'année et détermination de la grandeur transpiration

La **figure 16** présente l'évolution de la densité de flux moyenne mesurée de mai 2003 à mars 2004 au niveau des trois arbres Chétoui. Le maximum est observé au niveau de l'arbre 2 alors que le minimum est noté au niveau de l'arbre 1. L'amplitude des écarts entre les densités de flux des trois arbres est plus élevée en été.

Les densités de flux journaliers varient entre 5 l/dm²/jour (février) et 45 l/dm²/jour (août), donnant un flux journalier F_d allant de 5 l à 41 l pour une section totale moyenne du tronc de 1,13 dm^2 (diamètre moyen du tronc au cours de l'année de l'essai de 12 cm) et une section conductrice de l'eau de 0,906 dm^2.

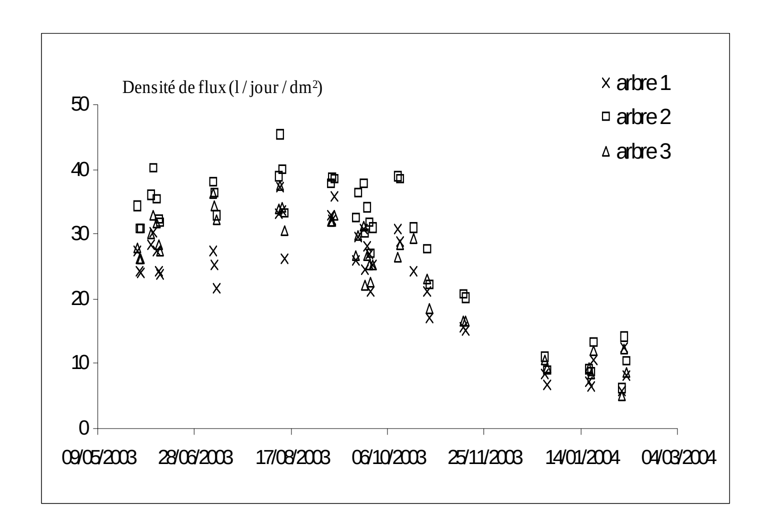


Fig.16 Evolution de la densité moyenne de flux de sève (l/dm^2/jour) chez de jeunes oliviers Chétoui au cours de la période Mai 2003–Mars 2004. Les données correspondent à une trentaine de jours caractérisés par un bon état hydrique du sol et des états de température et de rayonnement variables **(Masmoudi-Charfi *et al.,* 2011).**

La consommation journalière varie de 5 à 41 litres, donnant une transpiration allant de 0,14 mm à 1,14 mm pour des valeurs respectives d'ET_0 variant entre 1,5 mm (février) et 5,7 mm (Août). Le rapport T/ET_0 (représentant le coefficient cultural de base K_{cb}, donc la transpiration), a varié de 0,09 à 0,20. Ceci veut dire que **la transpiration maximale mesurée au mois d'août est de l'ordre de 20%ET_0** (35 mm). Le rapport T/ET_c est égal à 0,53. Ces valeurs sont comparables à celles qui ont été rapportées par **Moreno *et al.,* (1996)** et **Fernandez et Moreno (1999),** selon lesquels l'olivier adulte Manzanille conduit sous irrigation consomme 35 à 39 litres d'eau/jour pour une surface foliaire de 21 m^2 soit 1,65 mm/jour. Le flux maximum enregistré chez l'olivier non irrigué est de 0,78 mm/jour, il n'atteint jamais le niveau de transpiration des arbres irrigués même après irrigation.

Conclusion Générale

La méthode climatique ne permet pas de dissocier les composantes (T) et (E). C'est pourquoi il est utile de faire recours à des mesures ponctuelles, en l'occurrence, la mesure du flux de la sève brute a permis de déterminer la quantité d'eau réellement consommée par l'arbre, pris en tant qu'individu et qui est nettement plus faible que la valeur estimée par la méthode de la FAO. Pour des oliviers jeunes, elle ne représente en période de pointe que 20% ET_0.

Chapitre 9

CONSOMMATION EN EAU DE L'OLIVIER BILAN HYDRIQUE

La méthode du bilan hydrique permet de déterminer l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal in situ **(Palomo *et al.*, 2002 ; Abid-Karray, 2006).** Sous irrigation localisée et en absence de pertes d'eau par drainage, par percolation profonde ou par ruissellement (dose correspondant au besoin) et de remontée capillaire, **le bilan hydrique** s'écrit :

$$(P_e + I) - \Delta S = ET_r$$

Où :
P_e : pluie efficace,
I : quantité d'eau d'irrigation,
ET_r : Evapotranspiration réelle de la culture,
$\Delta S = S_f - S_i$, variation du stock d'eau avec S_f et S_i les teneurs en eau du sol observées à la fin et au début de la période d'étude.

Les teneurs en eau du sol au début (S_i) et à la fin (S_f) de la période considérée sont déterminées à partir de mesures de l'humidité volumique du sol (H_v, %), telle que :

$$S\ (mm) = 10 \times H_v\ (\%) \times D\ (m)$$

H_v est déterminée au moyen de la gravimétrie, de la sonde à neutrons ou par la méthode TDR (Time Domain Reflectrometry) et D, étant la profondeur d'enracinement (m).

Chapitre 10

PILOTAGE DE L'IRRIGATION MESURES DIRECTES ET INDIRECTES

Le pilotage de l'irrigation peut se faire à travers un suivi de l'état hydrique ou énergétique du sol ou de la plante ou des deux à la fois moyennant un suivi tensiométrique, des mesures régulières de l'humidité du sol ou encore des mesures micro-morphométriques qui permettent de guider l'oléiculteur pour mener à bien l'irrigation.

1- Mesures au sol

1-1-Tensiomètre

1-1-1- Intérêt et principe

Le tensiomètre permet de contrôler de manière simple et fréquente l'état hydrique du sol. C'est un moyen pratique et peu coûteux qui nous renseigne sur la disponibilité de l'eau pour la culture. **Le tensiomètre ne mesure pas la teneur en eau du sol** mais les forces de rétention de l'eau (tensions ou succions en centibars ou cb) par les particules du sol à une profondeur donnée ; plus le sol est sec (peu d'eau), plus l'eau est retenue par les particules du sol et plus le niveau de succion serait élevé (forte tension). Ainsi, les tensions (valeur de dépression lue sur le manomètre du tensiomètre) augmentent lorsque le sol se dessèche et elles diminuent lorsque le sol est humide. En général, une zone de très forte teneur en eau est observée près du distributeur d'eau. L'humidité diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne latéralement du point d'eau.

1-1-2- Appareillage

Le tensiomètre à eau est constitué d'un tube en plastique fermé, une bougie en céramique poreuse à sa partie inférieure et un manomètre au sommet. Il est disponible en plusieurs longueurs, de 30 à 150 cm **(CTIFL, 1999 ; Tron *et al.,* 2000)**.

1-1-3-Installation et précautions

La mise en place des tensiomètres est délicate et nécessite une préparation préalable de l'appareil qui consiste à 'dégazer' les tubes (en les remplissant d'une eau portée à ébullition), puis de s'assurer de la saturation des pores de la bougie. Un contrôle du manomètre est souhaitable. Les tensiomètres sont ensuite placés **de manière permanente** dans des trous carottés dans le sol à l'aide d'une tarière à spirale à une distance et à une profondeur qui dépendent de l'intérêt de leur usage et du type de sol **(Fig.18 et Photo 16)**, mais pas directement sous un arroseur ni en dehors de la zone irriguée. Les tensiomètres devraient être placés **en périphérie du bulbe humide,** ce qui permet de réajuster périodiquement les doses d'irrigation.



Photo 16. Installation des tensiomètres au niveau du bulbe humide.
(www.afidol.org).

Le contact entre le tensiomètre et le sol environnant est assuré par l'écoulement d'une boue épaisse qui chassera progressivement l'air se trouvant dans le trou. Il est conseillé de placer un tensiomètre à 30 cm de profondeur et un autre à 60 cm, ce qui permet d'analyser la dynamique des réserves du sol. Un troisième tensiomètre peut être positionné à 90 cm pour définir la dose d'irrigation et contrôler le drainage de l'eau **(Tron *et al.,* 2000)**.

-*Tensiomètre placé à 30 cm de profondeur* permet de déterminer le moment opportun de déclencher l'irrigation en début de saison. Si la tension de cette sonde ne chute pas dans les 24 h après la première irrigation, c'est que la dose a été trop faible.
- *Tensiomètre placé à 60 cm de profondeur* donne une indication de l'état hydrique du sol entre 2 irrigations. Celui-ci doit être maintenu à des valeurs comprises entre le sol ressuyé et le confort hydrique.
- *Tensiomètre placé à 90 cm de profondeur* nous permet de détecter l'engorgement du sol. Une tension nulle pendant plusieurs jours signifie qu'il y a engorgement du sol. La dose a été trop forte. Dans ce cas il faut différer les irrigations suivantes pour permettre l'assainissement des couches profondes.

Le **tableau 14** donne des indications sur l'emplacement des tensiomètres.

Tableau 14. Distance entre le tensiomètre et le distributeur de l'eau

Profondeur du tensiomètre	**En goutte-à-goutte**	**En micro-aspersion**
30cm	30 cm du goutteur	A 2/3 de la distance entre le diffuseur et la fin du jet
60cm	A mi-distance entre le goutteur et la sonde placée à 30cm	A mi-distance entre le diffuseur et la sonde placée à 30 cm
90cm	A hauteur de la sonde à 60cm	A hauteur de la sonde à 60 cm.

Tron *et al.,* (2000).

Le mauvais positionnement des tensiomètres donne de fausses indications quant au moment de déclencher les irrigations **(Fig.17)**.

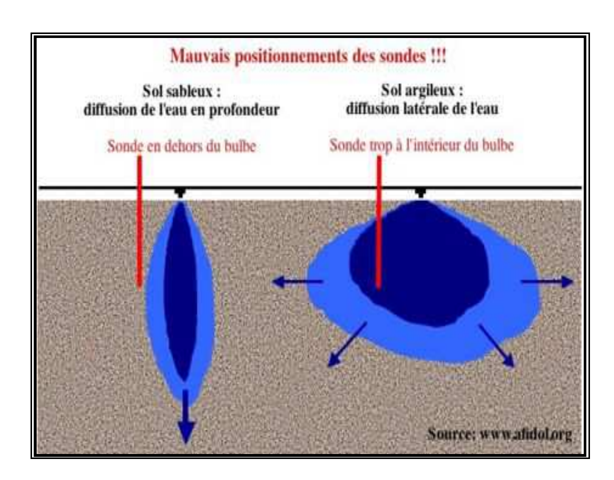


Fig.17. Cas de mauvais positionnement des tensiomètres (www.afidol.org)

Dans les terres filtrantes, le tensiomètre 30cm devrait être placé à moins de 30 cm étant donné que l'eau diffuse peu latéralement. Par contre, en sol argileux, le tensiomètre sera placé à plus de 30 cm du goutteur. Il est important de multiplier les points de mesures surtout lorsque le terrain n'est pas homogène sur toute la surface (par exemple, 3 séries de 2 sondes à des profondeurs de 30cm et 60 cm).

1-1-4- Relevés tensiométriques et pilotage de l'irrigation

Le tensiomètre nécessite une surveillance régulière et fréquente. La gamme de tension mesurée est limitée au maximum à la pression atmosphérique ambiante. Les relevés doivent être effectués au moins 2 fois par semaine et enregistrés sur une fiche appropriée. La lecture de la mesure est directe et est indiquée en cb sachant que :

1 centibar (1 cb) = 1 kilo Pascal (1 kPa)

Les valeurs indiquées dans le **tableau 15** donnent une idée sur l'état hydrique du sol et donc le moment opportun pour agir sur l'irrigation.

Tableau 15. Etat hydrique du sol en rapport avec les relevés tensiométriques.

Mesures en centibars	Etat du sol
0-10	Sol saturé avec risque d'asphyxie
10-15	Sol ressuyé
15-50	Confort hydrique (RFU) - irrigation
50-100	Fin de la RFU (situation de stress)

Gendrier *et al.*, (1999) - Tron *et al.*, (2000).

Grace à ces relevés il est possible de fixer la fréquence des irrigations **(Tableau 16).**

Tableau 16. Pilotage de l'irrigation par relevés tensiométriques.

Paramètre à suivre	**En goutte-à-goutte**	**En micro-aspersion**
Fréquence	2 fois par semaine avant de déclencher l'irrigation	Variable par principe de la micro-aspersion
Valeurs tensiométriques en augmentation	Augmenter le temps d'apport	la période entre deux arrosages doit être réduite
Valeurs tensiométriques en réduction	Réduire le temps d'irrigation	les irrigations doivent être davantage espacées
Si les tensions chutent sur la sonde à 90 cm suite à de fortes précipitations	les apports d'eau doivent être fractionnés	la dose définie lors de la première irrigation doit être revue à la baisse.
Par l'irrigation, les tensions mesurées à 30 cm de profondeur doivent être maintenues autour de :	40 cb en sols sableux, 50 cb en sols limoneux, 60 cb en sols argileux.	60 cb en sols sableux, 70 cb en sols limoneux, 90 cb en sols argileux.

Tron *et al.*, (2000)

La durée maximale d'un apport d'eau est le temps écoulé entre le début de chute de tension et le début de l'irrigation. Il n y a pas lieu de renouveler l'arrosage tant que les tensions observées aux différents points ne dépassent pas celles qui ont été enregistrées avant l'apport précédent. Après chaque pluie, les tensions doivent être relevées

1-1-5- Limites du pilotage de l'irrigation par tensiométrie

Les tensiomètres peuvent présenter certaines imprécisions de mesure dues à un mauvais positionnement ou une usure prématurée du matériel.

1-2- Sondes capacitives

Les sondes capacitives permettent de déterminer l'état des réserves hydriques du sol à une profondeur donnée. La mesure de l'humidité volumique du sol (H_v) peut être effectuée soit par gravimétrie soit en utilisant la sonde à neutron ou la sonde TDR ((Time Domain Reflectrometry / réflectométrie en domaine temporel). L'utilisation des sondes capacitives est généralement limitée au domaine de l'expérimentation en raison du coût, de la complexité de leur utilisation ou de la dangerosité d'emploi, par exemple de la sonde à neutrons, qui nécessite par ailleurs, un étalonnage **(Photos 17 et 18)**, c.-à-d. l'établissement d'équations de corrélations entre les comptages de la sonde et des mesures gravimétriques, effectuées pour différents états hydriques du sol. Les échantillons de terre sont prélevés à la tarière et pesés frais au moyen d'une balance de précision 1/100, puis séchés à 105°C jusqu'à constance du poids (48 heures). La valeur de H_v est donnée par :

$$H_v = H_m \times d_a \qquad \text{avec } H_m = [(P_f - \text{Tare}) - (P_s - \text{Tare}) / (P_s - \text{Tare})] \times 100$$

H_m est l'humidité massique et d_a est la densité apparente du sol ou masse volumique apparente

Les valeurs de d_a sont déterminées à partir d'échantillons de terre non perturbés, prélevés à différentes profondeurs au moyen d'anneaux en acier de 100 cm^3 (montés à l'extrémité d'une tarière courte). Ils sont pesés frais avec leur tare puis séchés à 105°C. La densité apparente d_a est exprimée par :

$$d_a = P_s/V$$

P_s étant le poids sec de l'échantillon de sol.

Remarques

-Pour obtenir une mesure par couche de sol, creuser une tranchée et y prélever au fur et à mesure les échantillons.

-Déterminer d_a pour chaque horizon du sol afin de pouvoir disposer d'une valeur de la teneur en eau dans chaque tranche de sol. La variation de la texture du sol est à l'origine d'une variation de sa teneur en eau.

- Pour piloter au mieux l'irrigation, le bilan hydrique doit être associé à l'utilisation de relevés tensiomètriques.




Photo 17. Prélèvement d'échantillons de sol pour la détermination de son humidité volumique par gravimétrie.




Photo 18. Détermination de l'humidité volumique du sol au moyen de la sonde à neutrons (SOLO 25)

2- Mesures au niveau de la plante

2-1- Mesures micro-morphométriques au moyen du Système PEPISTA

La mesure des variations des dimensions de la tige ou des fruits au moyen de capteurs thermiques (système PEPISTA) permet de repérer le moment opportun d'apport de l'eau. Cette mesure dite **micro-morphométrique** est révélatrice de l'intensité de la transpiration de la plante et de la mobilisation de ses réserves en eau. Ce suivi permet de distinguer chez les fruits en croissance une phase diurne décroissante et une phase nocturne à croissance régulière. Au cours de la journée, la réduction du diamètre du fruit au-delà d'un certain seuil que l'on se fixe, indique que le sol ne fournit plus assez d'eau pour un fonctionnement normal de la plante. L'appareil (bio-programmateur) est capable de repérer cette chute de dimension et de lancer l'irrigation. La **photo 19** et la **figure 18** sont des exemples illustratifs de mesures micro-morphométriques.



Photo.19. Mesure des variations micro-morphométriques du diamètre du tronc in situ au moyen du système PEPISTA **(CEMAGREF, 1990).**

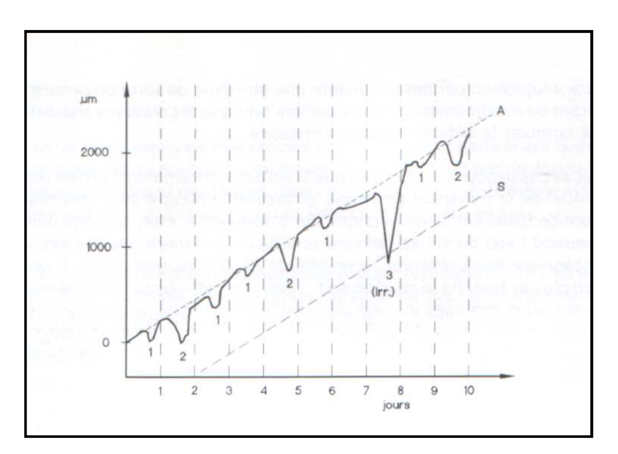


Fig.18. Variation du diamètre d'un fruit (citron) en cours de croissance **(CEMAGREF, 1990)**.

Les amplitudes diurnes marquées 1 correspondent à des demandes climatiques moyennes sans déficit d'eau dans le sol. Les amplitudes 2 correspondent à des demandes climatiques plus fortes mais normales. Dans le cas « 3 » il y a une forte demande climatique avec un déficit d'eau dans le sol, nécessitant l'irrigation. Au cours de la nuit séparant le 7^{e} et le 8^{e} jour, la plante n'est pas parvenue à récupérer la quantité d'eau qu'elle a perdue ce qui aboutit à une réduction de la dimension du fruit le 8^{e} jour. Le seuil de soif est franchit. Ceci marque une déshydratation tissulaire au-delà de laquelle la plante déclenche son mécanisme de régulation stomatique, c.-à-d. qu'elle ferme en plein jour ses stomates pour réduire sa transpiration au détriment de son efficacité photosynthétique. L'irrigation est déclenchée une fois le seuil de soif est atteint.

2-2- Température de surface du couvert végétal

La température de surface du couvert végétal est un indicateur de l'état hydrique de la plante, qu'on utilise pour piloter l'irrigation (cas des agrumes dans le cap-bon). Cette température dépend du refroidissement des feuilles suite à l'évapotranspiration, elle-même fonction de la disponibilité de l'eau dans le système sol-plante.

Pour un couvert évaporant en pleine activité, sans contrainte hydrique, la température de surface T_s est inférieure à la température ambiante de l'air T_a. L'écart de ces températures est proportionnel au régime d'évaporation. Lorsque la plante est en déficit hydrique, sa température de surface augmente ; son évapotranspiration est réduite par régulation thermique. Dans ce cas T_s devient supérieure à T_a. On mesure cette température au moyen d'un pistolet infra – rouge, généralement au voisinage du midi solaire. L'évolution de la différence (T_s-T_a) au cours de plusieurs journées est bien corrélée au bilan hydrique contrairement aux mesures ponctuelles qui sont sensibles aux variations instantanées des paramètres microclimatiques. Pour piloter l'irrigation on utilise le cumul des écarts journaliers (positifs).

L'application 14 présente un exemple d'utilisation de la sonde à neutrons pour le suivi de l'état hydrique du sol au niveau d'une jeune oliveraie.

Application 14

Travaux de recherches menés en Tunisie.

Utilisation de la sonde à neutrons pour le suivi de l'état hydrique du sol d'une jeune plantation d'oliviers Chétoui conduite sous irrigation de complément.

a – Répartition des tubes d'accès de la sonde à neutrons

Le suivi de l'humidité du sol a été réalisé en période d'irrigation moyennant des mesures à la sonde à neutrons (Modèle Solo 25), effectuées tous les 2 à 3 jours, en utilisant des tubes d'accès en PVC (Masmoudi-Charfi, 2008) implantés autour de trois oliviers Chétoui à une profondeur de 1,5 m. En raison de l'hétérogénéité du développement radiculaire et de celui de la canopée, l'emplacement des tubes a été minutieusement réfléchi et choisi (Fig.19).

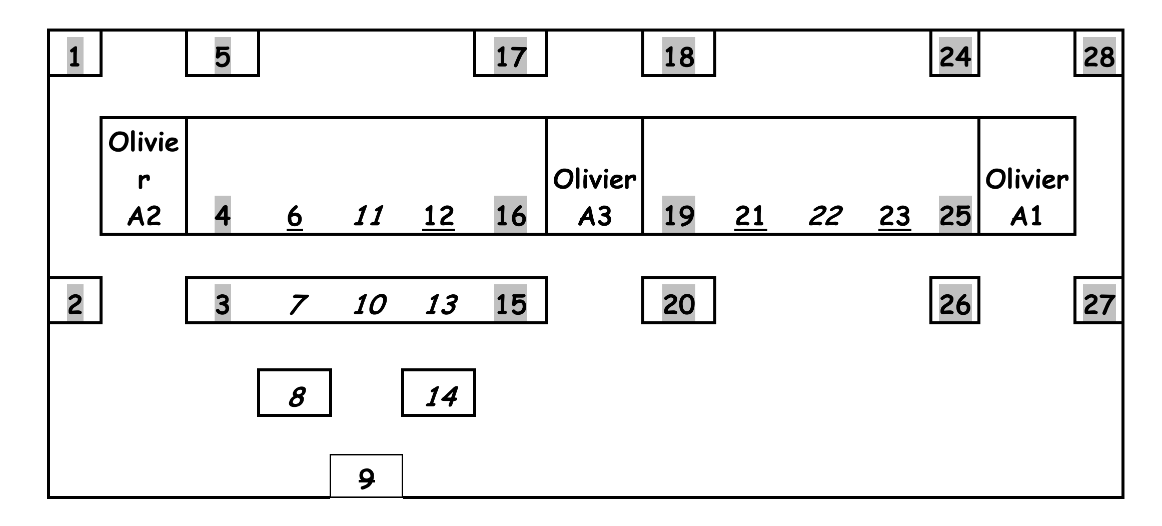


Fig.19. Distribution des tubes d'accès de la sonde à neutrons (numérotés de 1 à 28).

Les tubes ont été placés sous la frondaison des arbres (colorés en gris), sur la ligne entre deux oliviers (tubes portant un numéro soutiré) et au centre du carré formé par quatre oliviers (tube N°9). Les tubes placés sous les arbres (Photo 20) et sur la ligne entre deux oliviers sont représentés par trois et deux répétitions respectivement. A partir de ces mesures, l'humidité volumique (H_v) a été déterminée pour les différentes profondeurs après avoir étalonné la sonde neutronique. Le stock d'eau dans le sol a été estimé pour chaque tranche de sol jusqu'à une

profondeur 1,2 m. Pour une distance de 0,2 m, le stock est égal à deux fois la valeur de H_v exprimée en pourcentage.



Photo 20. Tubes d'accès de la sonde à neutrons placés autour du pied d'olivier.

b - Etalonnage de la sonde à neutrons SOLO 25

L'étalonnage consiste à déterminer des relations entre les comptages de la sonde et l'humidité volumique du sol. Les relations établies entre H_v, déterminée par gravimétrie et le quotient (N*) égal au rapport de la mesure au sol (N_{sol}) par la mesure dans l'eau (N_{eau}), présentent des coefficients de corrélation variant de 0,69 à 0,83 pour la tranche de sol allant de 0,2 à 1,0 m de profondeur (Fig.20). Pour la couche de surface nous avons utilisé les valeurs de l'humidité déterminées par gravimétrie.

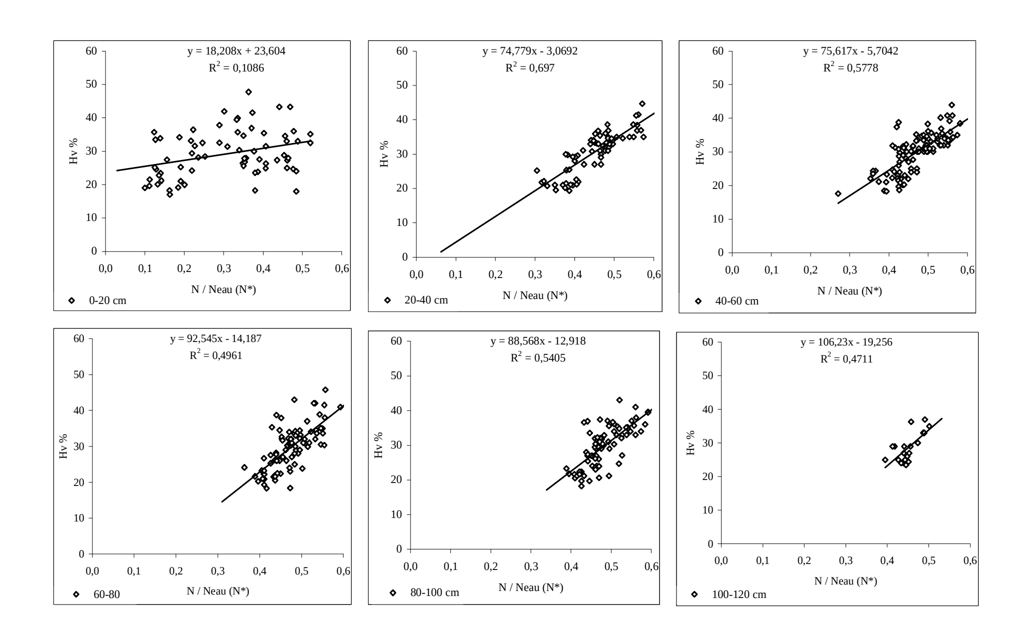


Fig.20. Courbes d'étalonnage de la sonde à neutrons (SOLO 25) pour différentes profondeurs, exprimant l'humidité volumique du sol (H_v, %) déterminée par gravimétrie en fonction du quotient N* égal au rapport entre les mesures dans le sol (N) par les mesures dans l'eau (N_{eau}), effectuées au moyen de la sonde à neutrons SOLO 25.

Remarque

La figure représentant la tranche de sol 0-20 cm est donnée à titre illustratif, montrant une faible 'corrélation' entre les comptages de la sonde et l'humidité déterminée par gravimétrie.

c – Analyse des données

Pour étudier l'évolution du stock d'eau dans le réservoir sol, les mesures ont été organisées en quatre groupes selon leur distance du tronc (Fig.21).
- Réservoir G1 est représenté par les mesures effectuées dans un rayon de 1,4 m du tronc. Il caractérise la zone d'irrigation ombragée par la frondaison.
- Réservoir G2 regroupe les tubes situés dans un rayon de 2 m, à la limite de la zone des racines mais non couverte par la frondaison.
- Réservoir G3, regroupe les mesures faites en dehors de la zone des racines et jusqu'à mi-distance de deux oliviers, à une distance comprise entre 2,2 et 2,8 m du tronc.
- Réservoir G3 est représenté par le tube situé à 4,2 m du tronc au centre du carré formé par quatre arbres voisins. Il est directement exposé au rayonnement solaire et reçoit uniquement les apports d'eau de pluie.

d – Evolution du stock d'eau dans les 4 compartiments à l'échelle de la campagne

Les stocks d'eau ont varié considérablement en fonction des saisons et en rapport avec l'activité de la plante et l'importance de la demande climatique. La figure 21 représente l'évolution du stock d'eau durant la campagne de mesures en rapport avec les évènements pluvieux et l'irrigation.

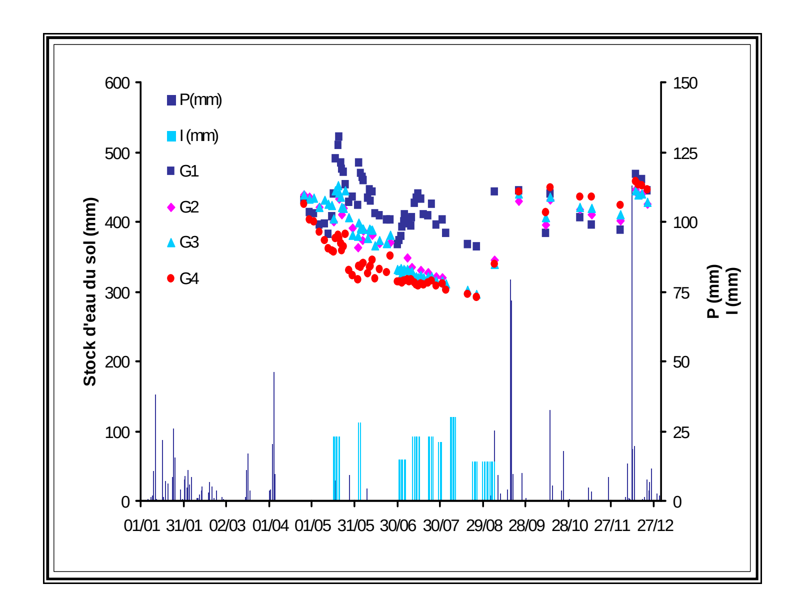


Fig.21. Evolution du stock d'eau dans le sol (mm) durant l'année 2003 au niveau des 4 zones considérées. G1: 1,4 m du tronc, G2: 2m du tronc, G3: 2,2 à 2,8 m du tronc, G4: 4,2 m du tronc. Les bâtonnets représentent les lames d'eau de pluie (P) et d'irrigation (I).

- En période de pluie, les stocks d'eau ont augmenté dans tous les compartiments avec une homogénéisation de l'état hydrique du sol.
- Au cours de la saison d'irrigation, le stock a évolué en dents de scie avec une tendance à la baisse, en réponse à l'alternance des périodes d'apport de l'eau et d'arrêt de l'irrigation suite à

une panne (Juillet -Août). Les écarts importants observés entre les 4 groupes résultent de l'apport localisé de l'eau (irrigation) et de l'importance relative des processus d'évaporation et de transpiration au niveau de chaque réservoir. L'humidité est plus élevée sous la frondaison qu'ailleurs. Ses valeurs ont oscillé entre 30% et 40% en fonction de la profondeur.
- En l'absence d'apport d'eau par la pluie ou par l'irrigation, le sol entre dans une phase de dessèchement. Le profil est déplacé davantage vers la profondeur du sol. L'humidité au niveau des réservoirs G1 (sous la frondaison) et G4 (hors de la portée des racines) est plus faible que celle qui est observée au niveau des réservoirs intermédiaires sous l'effet, respectivement, des processus de transpiration (G1) et d'évaporation de l'eau du sol (G4).
- Les variations les plus importantes de l'humidité du sol sont observées au niveau de la tranche 0-40 cm dans toutes les situations.

Ces variations sont liées aux différents processus évaporatoires et à l'activité radiculaire.
-Le groupe 1 a présenté les valeurs les plus élevées entre mi mai et début septembre en raison de l'apport localisé de l'eau. Ce groupe est principalement soumis à l'absorption radiculaire en vue de subvenir à l'appel de transpiration et aux besoins du métabolisme. En absence d'apport de l'eau, cette zone présente des taux d'humidités faibles.
-Les groupes G3 et G2 ont présenté des valeurs intermédiaires du fait qu'ils ne sont pas soumis à l'irrigation et bénéficient d'un ombrage partiel en cours de journée, qui réduit la composante évaporation du sol. Cette zone est soumise à l'effet de la pluie mais également sujette aux transferts latéraux de l'eau en raison de la présence d'une certaine masse de racines.
-Le groupe 4 a présenté un stock plus faible en raison de l'absence de l'irrigation et de l'effet de l'évaporation directe du sol, mais il a dépassé tous les autres groupes en période de pluie à cause de l'absence des racines et la baisse de l'évaporation du sol en cette période de l'année.

e- Conclusion et Recommandations

Le fonctionnement du réservoir sol varie selon la position par rapport au tronc en raison de l'hétérogénéité de la répartition des racines même en dessous de la canopée et de la variation de la couverture du sol. **Chaque compartiment du sol doit être considéré comme un réservoir à part entière, en particulier pour la zone d'irrigation et qui se distingue nettement des autres. La complexité du système rend difficile l'établissement du bilan hydrique pour l'ensemble de la parcelle** comme il a été rapporté dans d'autres travaux notamment ceux de **Rhaiem (1971), Riou (1978) et Villagra *et al.,* (1995).** La consommation en eau de la culture peut être déterminée en intégrant des mesures complémentaires, par exemple la mesure du flux de la sève brute.

Chapitre 11

L'IRRIGATION DEFICITAIRE

1-Introduction

L'irrigation de l'olivier est pratiquée dans la plupart des plantations de manière empirique. On assiste alors à deux situations: où l'eau est insuffisante pour combler le déficit climatique et permettre à la plante de croitre et de produire aisément, ou au contraire, les apports sont trop copieux et d'énormes quantités d'eau sont perdues. Nous avons publié en 2006 un document technique, présentant une estimation des besoins en eau de l'olivier en fonction de l'âge et de la couverture du sol **(Masmoudi-Charfi, 2006).** Cependant, soucieux d'économiser plus d'eau, des recherches ont été réalisées dans différentes régions de la Tunisie notamment à Kairouan **(Chehab, 2007),** Sfax **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2010),** Mornag et Nabeul pour étudier la possibilité de réduire les apports d'eau d'irrigation sans affecter significativement la production et ce en utilisant le concept de l'irrigation déficitaire, qui a été utilisé en Espagne **(Mickelakis, 1986 ; Sole-Riera, 1989 ; Goldhamer *et al.*, 1993 ; Fernandez *et al.*, 2003 ; Connor, 2006 ; Moriana, 2006 ; Mriana *et al.*, 2003)** pour mieux contrôler le développement végétatif des arbres et leur productivité.

2- Concept de l'irrigation déficitaire

Principe: fournir une quantité d'eau d'irrigation inférieure aux besoins optima de l'arbre.

But: Maintenir la production à un niveau acceptable avec une économie de l'eau.

Il existe plusieurs stratégies:

- DI *déficit irrigation* : appliquer des quantités d'eau inférieures au besoin optimum au cours du cycle de l'olivier ou d'une partie de ce cycle sans affecter significativement le produit fini.

- PRI *partial root irrigation* : appliquer l'eau d'un côté ou de l'autre des racines. Le manque d'eau temporaire du côté non irrigué produirait des signaux de stress qui semblent stimuler la production de fleurs et de fruits.

3-Objectif spécifique des travaux réalisés

Etudier le comportement végétatif, fructifère et productif de différentes variétés d'olivier cultivées en intensif vis-à-vis de l'irrigation déficitaire.

4- Méthodologie globale

Appliquer différents traitements hydriques avec des doses allant de 20%ET_c à 100%ET_c et évaluer la réponse physiologique et agronomique de plusieurs variétés sous des conditions environnementales diverses. Les besoins en eau de la culture (ET_c, mm) ont été estimés dans tous les cas à partir de la méthode de la FAO (Allen *et al.*, 1998).

5- Protocoles expérimentaux

Les expérimentations réalisées à Mornag, Nabeul et Taoues (Sfax) relatives à l'irrigation déficitaire sont détaillées dans les tableaux suivants.

Tableau 17. Conditions des essais et traitements hydriques appliqués à Mornag, Nabeul et Taoues

Ferme de l'INAT Mornag (2004-2007)	**Domaine de Taoues Sfax (2008-2009)**	**Ferme de l'INRGREF Nabeul (2010-2012)**
Latitude 36,8°, Altitude 10 m	Latitude 34°, Altitude 3 m	Latitude 36,6°, Altitude 10 m
Climat subhumide inférieur Déficit climatique : 750 mm/an	Climat semi-aride Déficit climatique : 1300 mm/an	Climat subhumide inférieur Déficit climatique : 800 mm/an
ET_o = 1200 mm/an	ET_o = 1660 mm/an	ET_o= 1200 mm/an
Pluie moyenne = 450 mm/an	Pluie moyenne = 250 mm/an	Pluie moyenne = 450 mm/an
Sol limono-argilo-sableux RU = 240 mm	Sol sablo-limoneux RU= 60 mm	Sol limono-sableux
ET_c = 391-445 mm selon année	ET_c = 580 mm/an	ET_c = 420 mm/an
Système goutte à goutte 2 rampes (+ vannes) 4 goutteurs/arbre 4 l/h/goutteur Bonne qualité de l'eau	Système goutte à goutte 2 rampes 4 à 8 goutteurs/arbre 4 à 10 l/h/goutteur Bonne qualité de l'eau	Système goutte à goutte 2 rampes 1 goutteur tous les 33 cm 4 l/h/goutteur Eau de 2-3g/litre de RS
Variétés : Chétoui, Meski, Picholine et Manzanille	Variétés : Chétoui, Chemlali, Coratina, Picholine et Manzanille	46 variétés, 3 arbres/variété
278 pieds/ha	204 pieds /ha	278 pieds/ha
4 blocs de 112 arbres chacun	5 Blocs de 9 arbres chacun	46 blocs de 3 arbres chacun
T1 : 100%ET_c, 15 jours/mois T4: 100%ET_c, tous les jours 2 rampes T2:50%ET_c, 2 rampes, t/2 T3: 50%ET_c, 1 rampe **T1 = T4 = 200 mm /saison** **T2 = T3 = 100 mm / saison**	T1: 20% ET_c, 4 goutteurs de 4 l/h, T2: 50% ET_c, 4 goutteurs de 10 l/h T3: 100% ET_c, 8 goutteurs de 10 l/h	70% ET_c Irrigation 2 fois/semaine, 3 goutteurs de 4 l/h/pied 2 rampes Dose appliquée : 6m^3/pied/saison

Tableau 18. Paramètres suivis à Mornag, Nabeul et Taoues

Ferme de l'INAT Mornag (2004-2007)	Domaine de Taoues Sfax (2008-2009)	Ferme de l'INRGREF Nabeul (2010-à ce jour)
ET_o journalier Hauteur de l'arbre, Périmètre du tronc Circonférence de la frondaison Longueur des rameaux Diamètre des olives Potentiel hydrique (CP Scholander) Humidité du sol (SN - SOLO 25) Production d'olives Bois de taille Productivité, EUE	ET_o journalier Diamètres du tronc et de la frondaison Hauteur de l'arbre, Longueur des rameaux Floraison - Nouaison Résistance stomatique (poromètre : AP4 Delta-T Devices' porometer) Potentiel hydrique (chambre à pression, pms Instrument co.), Humidité du sol (Gravimétrie) Contenu relatif en eau des feuilles Production d'olives EUE	ET_o journalier Croissance de l'arbre, Croissance des rameaux Floraison Humidité du sol Contenu relatif en eau des feuilles Production d'olives EUE Taux de couverture du sol (surface projetée de la frondaison)
3 arbres / variété 4 rameaux / arbre 5 fruits / arbre	3 arbres/variété/traitement 4 rameaux / arbre 5 fruits / arbre	





Chambre à pression :

Mesure du potentiel hydrique



Poromètre

Mesure de la résistance stomatique

Photo 21. Matériel de mesure du potentiel hydrique et de la résistance stomatique.

6- Résultats

6-1- Essai de Mornag

Le tableau ci-dessous présente les réponses à l'eau pour les paramètres de croissance et de production. Seules les réponses significatives au seuil de 5% sont rapportées.

Tableau 19. Valeurs moyennes des paramètres de croissance (accroissement annuel en %) et de production obtenues à Mornag.

	100%ET$_c$ Irrig.15j/mois	**50%ET$_c$ 2 rampes**	**50%ET$_c$ 1 rampe**	**100%ET$_c$ Irrig. quotidienne**
Hauteur de l'olivier	**19,6**	14,75	14,1	16,4
Ecart-type	**6,9**	1,3	14,7	7,3
Diamètre de la frondaison	8,8	8,3	**14,1**	11,6
Ecart-type	2,4	2,7	**3,1**	3,3
Diamètre du tronc	3,48	2,2	**3,88**	1,61
Ecart-type	0,9	1,99	**4,06**	3,54
Longueur des rameaux	48,78	45,83	**54,14**	49,66
Ecart-type	12,33	8,98	**15,00**	12,27
Diamètre de l'olive	3,99	3,9	**4,26**	3,62
Ecart-type	0,37	0,72	**0,76**	0,09
Rendement (T/ha)	2,84	2,69	**3,06**	3,74
Ecart-type	1,58	1,14	**2,31**	0,86
Bois de taille (Kg/ha)	**15,3**	13,8	13,4	14,8
Ecart-type	**1,7**	1,0	1,7	2,7
EUE (Kg/m^3)	1,63	**3,14**	2,87	0,98
Ecart-type	1,00	**1,81**	2,31	0,62
Indice de productivité (Kg d'olives/m^{3}de frondaison)	0,52	**0,80**	0,66	0,45
Ecart-type	0,39	**0,28**	0,54	0,34

Les meilleures réponses à l'eau ont été obtenues pour l'indice de productivité, le diamètre des olives, du tronc et de la frondaison, la longueur des rameaux, le rendement et l'EUE sous restriction hydrique contrôlée (RH : 50%ET$_c$) indépendamment du mode d'apport de l'eau (2 rampes ou 1 rampe). Pour la production de bois de taille et la hauteur de l'olivier, les meilleures réponses à l'eau sont fournies sous pleine irrigation (PI : 100%ET$_c$). Cependant, ces moyennes cachent des variabilités entre les variétés comme le montre le **tableau 20**.

Tableau 20. Traitements donnant les meilleures réponses à l'eau en fonction de la variété.

	Hauteur olivier	Diam. Frond.	Diam. Tronc	Long. Pousse	**Diam. Fruit**	Indice Productivité	EUE	Bois Taille	Production
Manzanille	PI/RH	RH	RH	RH	**RH**	RH	RH	PI	PI
Chétoui	PI	RH	RH	PI	**RH**	RH	RH	PI	RH
Meski	PI	RH	PI	PI	**RH**		RH	PI	PI
Picholine	RH	PI	PI	PI	**RH**	RH	RH	PI	RH

NB : PI : Pleine irrigation (T1 ou T4) et RH : Restriction hydrique contrôlée (T2 ou T3).

L'indice de productivité, le calibre du fruit et l'EUE sont plus élevés sous régime restrictif (RH) chez toutes les variétés. La production de bois de taille et la longueur des pousses sont privilégiées sous pleine irrigation.

6-2- Essai de Taoues

Les meilleures réponses à l'eau pour les paramètres de croissance, de fructification et de production sont présentées dans les **tableaux 21, 22 et 23**. Les résultats montrent des réponses controversées en fonction des variétés. Les meilleures EUE ont été obtenues avec Picholine, Coratina, Manzanille et Chétoui avec 20%ET_c et pour Chemlali avec 50%ET_c. **L'apport d'une quantité plus importante d'eau ne se traduit pas nécessairement par un meilleur état hydrique de la plante.** Chez la variété Coratina par exemple, la production augmente seulement de 17% en passant de 20%ET_c à 100%ET_c. De plus, les traitements les moins irrigués ne présentent pas les valeurs les plus faibles du potentiel hydrique. Le meilleur état hydrique est obtenu avec 50%ET_c pour Picholine et Manzanille, 20%ET_c pour Chemlali et 100%ET_c pour Coratina et Chétoui.

Tableau 21. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de croissance

	Diam. Frondaison	Nb max feuilles	Périm. Tronc	Long. Pousse	Diam Fruit	Diam Rameau	Nb EN	Nombre EN
Manzanille	T3	T2	T3	T3 = T2	T2	T3	T3	T3
Chétoui	T3	T3	T2	T2	T2	T1	T3	T3
Coratina	T3	T3	T2	T3	T1=T3	T1	T1	T1
Picholine	T2	T1	T3	T2=T3	T2	T3	T2	T2
Chemlali				T3		T1	T3	T3

La réponse à l'eau dépend de la charge en fruits et de la capacité de la variété à valoriser cette eau comme il l'a été rapporté dans les travaux de **Psyllakis (1973)** et **Michelakis (1990)**.Le niveau maximal de la résistance stomatique est observé vers midi avec des valeurs de l'ordre de 4 s/cm. Les variétés Chemlali et Chétoui montrent un écart significatif entre les 3 traitements avec des résistances plus faibles pour 100%ET_c. **Lorsque l'eau est disponible, la variété Chemlali semble consommer plus d'eau que les autres**. La charge en fruits pourrait expliquer ce comportement. La production moyenne de Chemlali est de 33,3 Kg/arbre contre 14,3 Kg/arbre pour Picholine par exemple. Un niveau plus bas de la résistance au début et à la fin de la journée est observé pour les traitements 100%ET_c et 50%ET_c.

Tableau 22. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de fructification

	Nb max Fleur /rameau	Nb fleur /cm	Nb fleur/ inflorescence	Nb inflorescence /cm	Taux de Nouaison	Nb fruit /cm
Manzanille	T2 etT3	T2	T3	T3	T1	
Chétoui	T3	T2	T2	T3		T2
Coratina	T3		T2	T3	T3	T3
Picholine	T3		T3	T3		
Chemlali	T3	T2		T2	T3	T3

Le **tableau 23** récapitule les paramètres de production.

Tableau 23. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de production.

	Production de 2 ans (kg/arbre)			EUE (Kg/m^3)		
	20% ETc	50% ETc	100% ETc	20% ETc	50% ETc	100%ETc
	120 mm	290 mm	582 mm	120 mm	290 mm	582 mm
Manzanille	8,2 b	3,6 d	11,5 b	1,9 b	0,35 d	0,55 b
Chétoui	6,7 c	3 e	8,95 c	1,55 c	0,3 e	0,4 c
Coratina	15,3 a	6,3 c	7,9 d	3,55 a	0,55 c	0,35 d
Picholine	3,2 d	17,9 a	16,95 a	0,75 d	1,7 a	0,8 a
Chemlali	16,7 a	8,5 b	12,65 b	3,9 a	0,8 b	0,6 b

NB : Les chiffres avec des lettres différentes indiquent un écart statistique significatif entre les variétés pour un même traitement au seuil de 5%.

6-3- Essai de Nabeul-Oued Souhil

-Croissance des olives

Bien que les besoins globaux en eau aient été largement couverts, un manque d'eau a été ressenti en période de nouaison et de grossissement rapide des fruits (entre le 25/5 et le 10/6). Cette situation a généré un faible accroissement relatif des fruits (+19,1%) suite à la rétraction du diamètre des olives au cours de la phase 1 de leur croissance chez un certain nombre de cultivars notamment Koroneiki (-1,4%), Branquita (-7,7%) et Sayali (-20,7%). La variété la plus touchée est Lucques (-22,1%). Un maximum d'accroissement a été noté chez la variété Picholine avec +53,6% alors que le minimum de +3,5% a été noté chez la variété Gemri **(Fig.22)**.

L'amélioration des conditions hydriques au cours de la Phase 2 de croissance des olives a engendré une amélioration de l'état général de l'ensemble des arbres. Les variétés qui ont présenté une rétraction du diamètre au cours de la phase 1 ont montré une croissance des fruits importante avec un accroissement relatif de +18,4% chez Koroneiki, +35,7% chez Branquita, +55,4% chez Sayali et de +62% chez Lucques. L'accroissement relatif moyen a été de 38% avec un maximum de 96,8% enregistré chez la variété Madurel et un minimum de 5,1% noté chez la variété Rkhami. Un accroissement de l'ordre de 32% a été observé chez la Meski, 10,8% chez la Chétoui, 15,4% chez la Chemlali et 35,7% chez la Picholine. A la mi-octobre, les variétés Ayvalik, Dhahbia, Madurel, Barouni et Gtar ont achevé plus de 80% de la croissance de leurs fruits.

Une baisse importante de l'humidité du sol a été notée au cours de la phase 1 avec un minimum atteint en juillet. A la fin de la saison d'irrigation un excès d'apport de l'eau a été enregistré, relevant les teneurs en eau à leurs valeurs maximales.

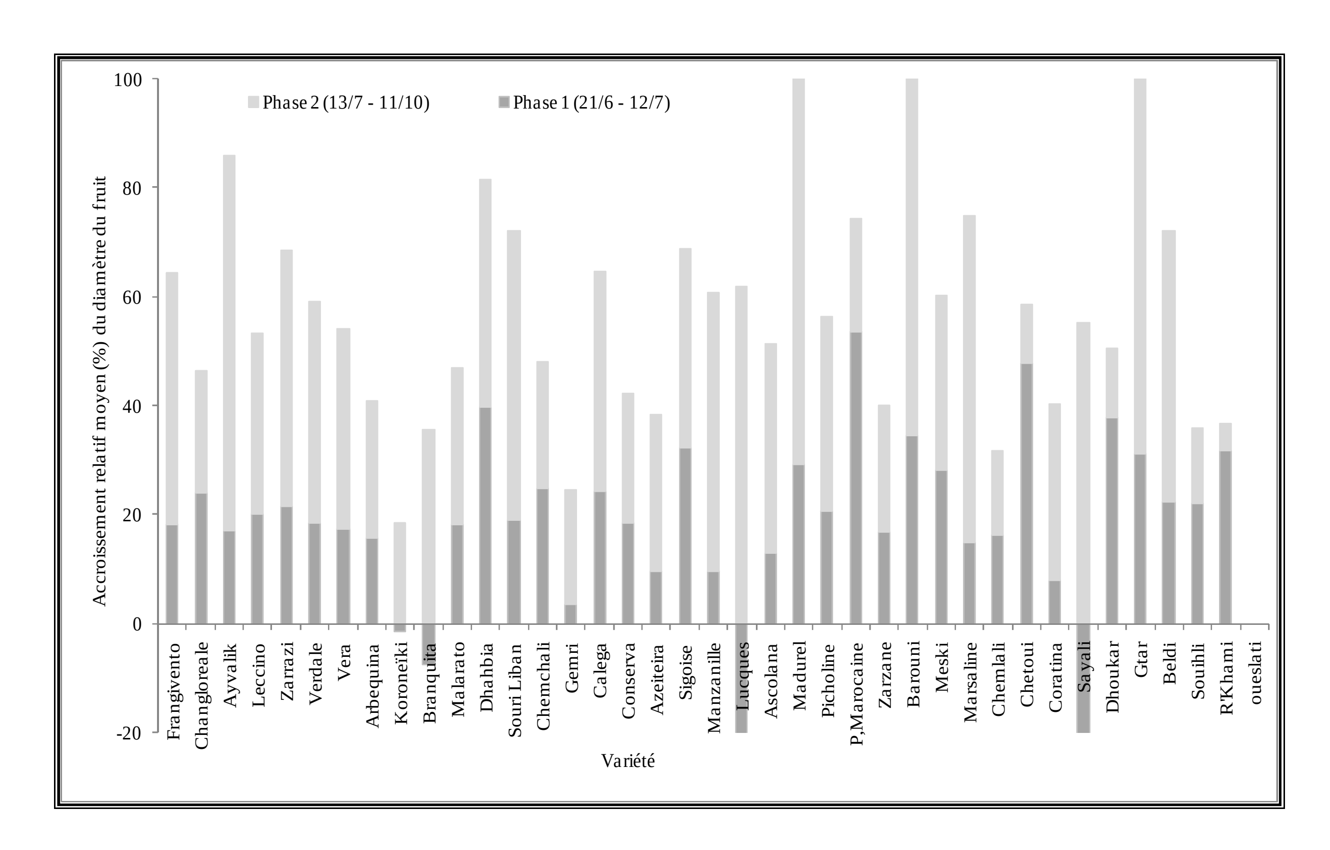


Fig.22. Accroissement du calibre des fruits au cours des phases 1 et 2 selon la variété.

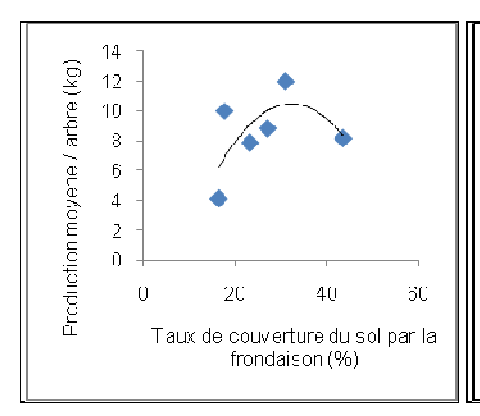
- Efficience de l'utilisation de l'eau

- en terme de croissance en diamètre de l'olive : La valeur moyenne est de 0,29 cm/m^3 d'eau d'irrigation appliqué. Les valeurs maximales et minimales sont respectivement de 0,44 cm/m^3 et de 0,14 cm/m^3. Des valeurs supérieures à 0,35 cm/m^3 ont été observées chez les variétés Zarrazi, Beldi, Souri Liban, Barouni, Meski et Marsaline caractérisées par un gros calibre avec un poids frais moyen allant de 6g à 12g à maturité.

-en termes de production : Les valeurs ont varié de 0,7 à 2,1 Kg/m^3 d'eau apportée. La variété Chemlali est la plus performante, suivie par les cultivars Koroneiki et Calegua, puis Arbéquina.

- Taux de couverture du sol et production

La production et l'EUE augmentent de façon linéaire et positive lorsque la couverture du sol augmente. Ceci s'explique par l'augmentation de la surface foliaire et donc une disponibilité plus importante d'assimilats qui permettent une meilleure alimentation de l'arbre aussi bien sur le plan minéral qu'hydrique (Fig.23). Mais au-delà d'une couverture de 30-35 % la production et l'EUE ont baissé. Une végétation importante (occasionnée par exemple par une mauvaise taille) expliquerait cette baisse de production, laquelle est étroitement liée à l'éclairement et à une bonne répartition de la lumière au sein de l'arbre.



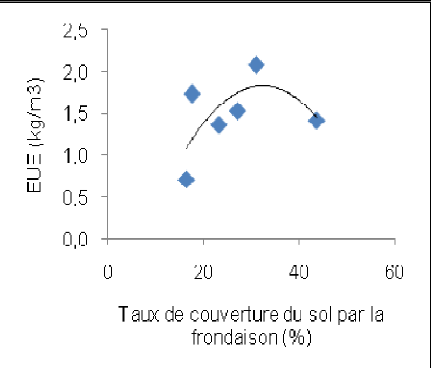


Fig.23. Relation entre le taux de couverture du sol par la frondaison (%), la production moyenne de l'arbre (Kg) et l'EUE (Kg/arbre) chez quelques variétés étudiées.

7-Conclusions

- La répartition de l'eau en fonction du stade de développement de l'olive est un facteur déterminant de la taille des fruits à maturité. Les possibilités de récupération du fruit sont possibles dans une certaine mesure lorsque l'eau devient disponible à un stade ultérieur, en particulier pour les fruits à gros calibre.

-Le taux de couverture du sol, et donc l'importance du système foliaire, est un facteur déterminant dans l'efficacité d'utilisation de l'eau. A ce titre il est nécessaire de réviser les valeurs du coefficient K_r relatif à la couverture du sol et qui est introduit dans l'équation de détermination des besoins en eau de la culture et de ne pas utiliser pour toutes les variétés (valeur moyenne pour toute la plantation multi variétale) un coefficient unique. Du point de vue pratique ceci est difficile à réaliser lorsqu'on a affaire à une parcelle multi variétale.

Chapitre 12

L'IRRIGATION FERTILISANTE

1-Exportation des éléments minéraux

Comme toute espèce ligneuse, l'olivier n'échappe pas aux lois générales de la nutrition minérale. Grâce à son système radiculaire, l'arbre puise dans le sol les éléments nutritifs nécessaires pour couvrir ses besoins en nutriments et ce pour la formation de sa charpente, la production, le renouvellement des pousses …etc. Ces prélèvements mobilisent chaque année une quantité plus ou moins importante d'éléments majeurs (N, P et K), d'éléments secondaires (Ca, Mg et S) et d'oligo-éléments (Fe, Zn, Mn, Cu, Bo, etc...), mais au vu de la longévité de l'arbre, ces exportations présentent une masse considérable d'éléments minéraux, qu'il faut restituer à temps et en quantités adéquates.

Le contrôle de la nutrition minérale de l'olivier et la détermination de ses besoins en éléments fertilisants se fait à travers **le diagnostic foliaire** (analyse minérale de certaines parties de l'arbre notamment feuilles et fleurs), qui a été mis au point vers les années 50 pour compléter l'analyse chimique au sol (Cottenie *et al.,* 1983). Cette dernière permet d'évaluer la richesse du sol en éléments nutritifs mais elle ne permet pas d'estimer leur disponibilité à la plante. L'interprétation du diagnostic foliaire se base sur la comparaison des valeurs obtenues avec des **normes** qui sont établies après plusieurs années d'observations et qui intègrent les variations nutritionnelles dues aux facteurs influençant l'alimentation minérale (Tableau 24). **Le seuil critique** indique la teneur de la feuille en un élément donné, en deçà de laquelle la plante sera en situation de carence en cet élément.

Tableau 24. Normes d'interprétation du diagnostic foliaire (Échantillons de feuilles prélevés en hiver).

Elément (teneur par rapport à la matière sèche)	Seuil critique
N (%)	1,4
P (%)	0,07
K (%)	0,5
Ca (%)	0,2
Mg (%)	0,06
Bo (mg/kg)	14
Fe (mg/kg)	40
Cu (mg/kg)	1,5
Mn (mg/kg)	5
Zn (mg/kg)	4

Loussert et Brousse, (1978).

Sur la base des quantités de minéraux exportés annuellement **(Rejeb et Bouaziz, 1981 ; Braham, 1997 ; Xiloyannis, 2002 ; Gargouri et Mhiri, 2003 ; Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2009)**, un calendrier de fertilisation est établi.

Le **tableau 25** donne un ordre de grandeur des quantités de minéraux majeurs (N, P, K) exportés dans les différents organes de l'olivier, sachant que les exportations de la partie souterraine et de la croissance annuelle aérienne sont particulièrement difficiles à estimer. Pour les vergers en pleine production, l'exportation en fruits est quasiment équivalente à l'exportation des autres organes de la plante.

Tableau 25. Exportations de l'olivier en éléments nutritifs majeurs selon l'organe.

Organe	Eau %	N%	P_2O_5%	K_2O%	Ratios		
					N	P	K
Racine secondaire	37,7	0,33	0,113	0,402	2,9	1,0	3,5
Racine primaire	45,5	0,37	0,123	0,477	3,0	1,0	3,8
Tronc	32,3	0,26	0,070	0,219	3,7	1,0	3,1
Charpentière	31,9	0,29	0,090	0,354	3,2	1,0	2,9
Branche	27,4	0,23	0,099	0,291	2,3	1,0	2,9
Rameau	40,3	0,64	0,179	1,000	3,5	1,0	5,5
Feuille 1 an	42,7	1,63	0,271	0,994	6,0	1,0	3,6
Feuille 2 ans	40,5	1,24	0,201	0,679	6,1	1,0	3,4
Fruit vert	60,6	0,90	0,333	2,760	2,7	1,0	8,3
Fruit crépu	46,1	0,97	0,397	3,220	2,4	1,0	8,1

Llamas, (1984).

1Kg de fruits exporte 10 g d'azote alors qu'un 1Kg de feuilles exporte 15 g d'azote.

2- Pratique de l'irrigation fertilisante: Matériel utilisé pour l'injection des éléments minéraux

L'irrigation au goutte à goutte offre la possibilité d'amener directement au niveau des racines des engrais équilibrés et directement assimilables au moment opportun. Il existe différentes méthodes de distribution des engrais: **le réservoir fermé ordinaire, l'injecteur Venturi et la pompe à injection**.

2-1- Réservoir d'engrais liquide (fermé)

Ce réservoir résistant à la pression du système, est connecté par une dérivation à la conduite d'alimentation de l'ouvrage de tête. Il est réglé par la pression différentielle créée par une vanne partiellement fermée, placée sur la conduite entre l'entrée et la sortie du réservoir. Une partie du débit est dirigée vers la conduite d'entrée du réservoir, où il se mélange avec la solution de fertilisants, puis la dilution est injectée dans le système. Les taux de dilution et d'injection ne sont pas constants. La concentration d'engrais est élevée au début et devient faible en fin d'opération. Toutefois, cet appareil est encore d'usage en raison de son faible coût et de sa fabrication aisée.

2-2- Injecteur Venturi

Cet injecteur fonctionne grâce à une différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'injecteur. Par conséquent, il est installé sur une dérivation placée sur une cuve ouverte contenant la solution de fertilisant. Le taux d'injection est sensible aux variations de pression et de petits régulateurs de pression sont parfois nécessaires pour garantir une injection constante. Les pertes de charge dues à la friction sont d'environ 1 bar. Les injecteurs sont en plastique avec des taux d'injection de 40 à 2000l/h. Ils sont relativement bon marché, comparés à d'autres injecteurs.

2-3- Pompe à piston

La pompe est activée par la pression de l'eau dans le système et peut être directement installée en ligne. L'écoulement de l'eau dans le système active des pistons qui permettent à la pompe d'injecter la solution d'engrais stockée dans une cuve, tout en maintenant un taux d'injection constant. Ces injecteurs sont constitués de matière plastique résistante et durable. Ils sont plus chers que les injecteurs Venturi.

3- Engrais utilisables en irrigation fertilisante

La solution mère est la solution fertilisante ou solution nutritive qui sera injectée. La solution fille est l'eau d'irrigation fertilisée après injection de la solution mère.

La concentration de la solution mère est définie par le poids d'engrais dissout (g) par unité de volume de la solution mère (litre).

Le taux d'injection (l/m^3) est définit par le rapport de débit de la pompe doseuse (l/h) par le débit de la conduite d'irrigation (m^3/h).

La salinité de l'eau d'irrigation fertilisée est le produit de la concentration de la solution mère et du taux d'injection (l/m^3 ou pour mille). Il est recommandé de veiller à ce que la salinité reste inférieure à 4g/l. L'irrigation fertilisante est déconseillée lorsque la conductivité électrique de l'eau dépasse 3 dS/m.

La solution d'engrais sous forme liquide est injectée dans le système en quantité limitée mais de manière répétée et en continu pendant l'irrigation **(Phocaides, 2008).** Le débit de l'injecteur doit être réglé de manière à maintenir un taux constant durant tout le cycle d'irrigation, c.-à-d. en commençant la fertilisation au début de l'irrigation et en la finissant quelques minutes avant la fin. Il est nécessaire de commencer l'irrigation par de l'eau claire afin de chasser l'air du réseau et de garantir l'imbibition du bulbe. Ensuite, l'irrigation est poursuivie par l'injection d'engrais en veillant à ce que la concentration des engrais dans l'eau d'irrigation ne dépasse pas 2‰. Suite à l'injection d'engrais, il faut s'assurer que l'irrigation continue par de l'eau claire en quantité suffisante pour garantir le passage complet du fertilisant vers la zone radiculaire.

Le choix des engrais dépend de leur solubilité, de leur acidité, de leur compatibilité et de leur coût. Il est impératif de choisir des engrais solubles (solides ou liquides). L'élément communément appliqué est l'azote. Toutefois, l'application de phosphore et du potassium est courante pour certains modes de conduites (olivier en hyper-intensif).

3-1- Solubilité

Le degré de solubilité des engrais varie en fonction du leur type.
-Le nitrate de potassium (13-0-46) a une faible solubilité, d'environ 1:8 (1 kg d'engrais sec dans 8 litres d'eau).
-La solubilité du chlorure de potassium (0-0-62) est de 1:3, tandis que celle du nitrate d'ammonium (34-0-0) et du nitrate de calcium (15,5-0-0) est d'environ 1:1.
-Les engrais secs phosphoreux ont une plus faible solubilité que les nitrates, soit environ 1:2,5.

3-2- Acidité

La solution mère doit avoir un pH acide variant entre 5 et 6. L'acidité produite par diverses formes d'azote varie selon le type d'engrais, l'eau d'irrigation et le type de sol. Une vérification du pH du sol au début de la saison est nécessaire, puis à la fin de la saison d'irrigation.

3-3- Quantité

La quantité d'engrais à appliquer est répartie le long du cycle de croissance en fonction des besoins spécifiques de chaque stade phénologique mais également en fonction du nombre d'irrigations. **Il est primordial de comptabiliser les quantités naturellement présentes dans l'eau d'irrigation.**

Les engrais généralement utilisés sont: l'urée, l'acide nitrique (N), le nitrate d'ammoniac (N), l'acide phosphorique (P), le sulfate de potassium, le phosphate mono potassique (P K), le nitrate de potasse (N K) et le nitrate de calcium (N). Certains produits apportent aussi des éléments mineurs comme le sulfate de magnésie ou le nitrate de magnésie **(Tableau 26)**.

Tableau 26. Quelques engrais utilisables en irrigation fertilisante (en % du poids)

Engrais	Azote % (N)	Phosphore% (P_2O_5)	Potassium % (K_2O)	Autres sels %	Solubilité g/l à 0°C	Solubilité g/l à 25°C
Azote						
Sulfate d'ammoniaque	21	-	-	Sulfate	700	760
Urée	46	-	-	(59,2)	-	-
Nitrate d'ammonium	33,5	-	-	-	670	1190
Nitrate de calcium	15	-	-	CaO (27)	1180	2190
Nitrate de magnésium	11	-	-	MgO (15,7)	1000	2600
Acide nitrique	12,6	-	-	-	Liquide	Liquide
Phosphate						
DAP	24	60	-	-	225	400
Acide phosphorique	-	52	-	-	Liquide	Liquide
Potassium						
Sulfate de potassium	-	-	50	Sulfate	74	125
Nitrate de potassium	13	-	46	(45,6)	130	335
Acides composés						
4-8-12	4	8	12		Liquide	Liquide
12-4-6	12	4	6		Liquide	Liquide
6-8-8	6	8	8		Liquide	Liquide

Il est possible d'utiliser des engrais composés ou certains engrais (solides et liquides) contenant des oligo-éléments, des matières organiques (acides fulviques, acides humiques, acides aminés…). Les engrais azotés et potassiques ne posent généralement pas de problèmes d'injection. Cependant, lorsque l'eau est calcaire, les phosphates peuvent précipiter. Il faut utiliser dans ce cas un engrais phosphaté acidifiant (phosphate mono-ammoniaque).

4- Programme de ferti-irrigation

Un programme de fertilisation doit être établi pour chaque parcelle en tenant compte des conditions du milieu et de l'état et du potentiel productif des arbres. A titre d'exemple, le **tableau 27** présente un programme d'irrigation fertilisante d'une parcelle d'olivier à huile plantée à une densité de 204 arbres/ha selon l'âge **(Gargouri, 2012)**. Les besoins rapportés dans ce tableau sont exprimés pour les éléments N, P_2O_5 et K_2O à l'état pur. De ce fait il est nécessaire de prendre en considération la concentration de ces éléments dans les fertilisants commerciaux.

Tableau 27. Programme de ferti-irrigation d'une parcelle d'olivier selon l'âge **(Gargouri, 2012).**

Mois	Elément g/arbre	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10
Février	Azote	1	2	5	30	60	120	150	190	220
	P_2O_5	2	2	5	11	10	25	45	100	125
	K_2O	2	2	4	10	20	35	65	90	110
Mars	Azote	1	4	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2	5	5	18	35	70	160	180	205
	K_2O	2	4	7	20	35	70	125	180	220
Avril	Azote	2	4	7	40	80	160	200	250	290
	P_2O_5	2	5	5	18	35	70	160	180	205
	K_2O	2	4	10	20	35	75	125	180	220
Mai	Azote	2	5	7	45	90	180	220	275	320
	P_2O_5	2	2	5	11	20	45	100	115	125
	K_2O	4	7	10	20	35	70	125	180	220
Juin	Azote	3	6	10	60	120	240	300	375	430
	P_2O_5	2	2	5	11	20	45	100	115	125
	K_2O	4	10	15	30	55	110	255	360	440
Juillet	Azote									
	P_2O_5									
	K_2O	2	5	9	20	35	70	125	180	220
Aout	Azote									
	P_2O_5									
	K_2O	2	5	9	20	35	70	125	180	220
Septembre	Azote	2	7	8	50	100	200	250	300	345
	P_2O_5	2	2	5	5	10	22	55	70	70
	K_2O	2	20	20	55	110	220	510	710	855
Octobre	Azote	2	7	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2	-	2	2	5	10	20	20	20
	K_2O		20	15	55	110	220	510	710	855
Novembre	Azote	2	5	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2			2	5	10	20	20	45
	K_2O		4	10	35	70	145	325	455	545

Avantages de la ferti-irrigation

- Gain de temps et d'effort.
- Disponibilité des engrais plus rapide et directement au niveau des racines.

Inconvénients de la ferti-irrigation

- Le coût : les prix des engrais solubles sont nettement supérieurs à ceux des engrais solides.
- Un déséquilibre se crée entre les zones irriguées (bulbe humide) et celles qui se trouvent en dehors des frondaisons.

Précautions à prendre

- Les équipements d'irrigation doivent être fabriqués en matériaux résistants à la corrosion.
-Le stockage des engrais à proximité des produits inflammables, des métaux, de la paille… peut présenter des risques d'explosion ou d'inflammation.
-Le stock de solution d'engrais doit être toujours dissout dans un contenant séparé, puis versé dans le réservoir d'amorçage.
-Les engrais solides doivent être très solubles et ne doivent pas former d'écume ni de sédiments susceptibles de causer des problèmes de colmatage des distributeurs lorsqu'ils sont dissouts dans l'eau.
-La solution doit toujours être agitée et bien brassée.
-Il faut retirer régulièrement les boues déposées au fond du réservoir.
-Le tuyau d'aspiration de l'injecteur ne doit pas reposer sur le fond du réservoir.
-L'eau chaude peut aider à dissoudre l'engrais desséché.
-Il ne faut pas utiliser les phosphates et les acides avec les sels de calcium ou de magnésium ou avec les eaux riches en ces éléments. Les eaux riches en calcium (> 70 mg/l) sont incompatibles avec les sulfates.

Application 15

Quantités d'engrais nécessaires en ferti-irrigation
Procédure de calcul

Données:

- **Culture**: X
- **Concentration d'engrais NPK**: 180-50-250 (exemple)
- **Type d'engrais disponible:**
  - Nitrate d'Ammonium (33,5-0-0) NH_4NO_3
  - Phosphate bi-ammonium DAP (16–48–0) $(NH4)_2HPO_4$
  - Chlorure de potassium (0-0-60) KCl
- **Débit du système**: 23 m^3/h
- **Dose d'irrigation**: 18 m^3
- **Durée de l'application**: 1 heure et demi.

Question : Quantité d'engrais à utiliser ?

Réponse: Les phosphates et le potassium sont donnés sous forme d'oxydes, par conséquent ils sont convertis en éléments P et K en les multipliant par 0,43 et 0,83 respectivement.

Calcul des quantités d'engrais requises en grammes par m^3 d'eau :

K = 250 x 100 ÷ (60 x 0, 83) = 0,502 kg KCl
P = 50 x 100 ÷ (48 x 0, 43) = 0,239 kg $(NH_4)2HPO_4$
Cette quantité procure aussi 32 g de N.
N = (180-32) x 100 ÷ 33,5 = 0,424 kg NH_4NO_3

Ainsi pour 18 m^3 d'eau, les quantités exactes sont:
0,502 kg x 18 = 9,036 kg KCL
0,239 kg x 18 = 4,30 kg $(NH_4)2HPO_4$
0,424 kg x 18 = 7,63 kg NH_4NO_3

Les quantités d'eau requises pour la dilution des quantités d'engrais ci-dessus sont estimées en tenant en compte de la solubilité des engrais:

9,036 kg KCL x 3 l = 27 l
4,30 kg Ca (H_2PO_4) x 2,5 l = 10,75 l
7,63 kg NH_4NO_3 x 1 l = 7,63 l

La quantité minimale d'eau requise est de 45 l.

Si les engrais sont dilués dans 60 litres d'eau et que la durée d'irrigation est de deux heures, alors le taux d'injection doit être d'environ 40 à 45 litres/heure afin d'achever l'irrigation fertilisante en environ 1 h 25 mn et de faire passer de l'eau claire 15 min avant et 20 min après.

Application 16

Calcul des quantités d'engrais nécessaires en irrigation fertilisante: Cas de l'olivier conduit en intensif

Données:

• **Culture:** plantation d'olivier de 3 ha cultivée selon un écartement de 4m x 1,5m soit 6 m^2 par arbre et 1666 arbres/ha
• **Dispositif d'irrigation** : 1 goutteur de 4 l/h/arbre (soit un débit d'irrigation/ha de 4 l/h x 1666 = 6664 l/h/ha ou 6,7 m^3/h/ha et une pluviométrie fictive de 4 l/h/6 = 0,66 mm/h).

. Besoins en eau journaliers de 3 mm sont couverts par une irrigation par jour soit un temps d'arrosage de 3/0,66 = 4h30 mn.

. Concentration des engrais: N: 10 Kg/ha P_2O_5 : 10 Kg/ha KO : 13 Kg/ha
• **Type d'engrais utilisés dans l'exemple. Engrais utilisé en % du poids**

Phosphate mono-ammoniaque (N:12 - P_2O_5 :61 – KO:0)
Nitrate de potasse (N:13 - P_2O_5:0 - KO:46)
Ammonitrate (N:33,5 – P_2O_5 :0 – KO:0)

Question : Quantité d'engrais à utiliser et débit de la pompe doseuse ?

Réponse:

-Les poids respectifs des engrais nécessaires par ha sont les suivants:

P_2O_5 = 10 Kg/ha (12-61-0), soit 10/0,61 = 16,4 Kg avec un apport d'azote de 16,4 x 0,12=1,97 Kg
KO = 13 Kg/ha (13-0-46), soit 13/0,46 = 28,3 Kg avec un apport d'azote de 28,3 x 0,13 = 3,66 Kg
N =10 Kg/ha avec un apport par les engrais précédents de 5,63 Kg, soit un apport par l'ammonitrate N (33,5-0-0) de 10 – 5,63 = 4,37 Kg, le poids étant de 4,37/0,335 = 13 Kg

Débit de la pompe doseuse

Les postes d'irrigation ont une durée d'arrosage de 4h30mn.
L'injection des engrais doit être réalisée dans le début du poste.
Le temps de rinçage pour obtenir une eau claire dans tout le réseau est de 30mn.
Toute la solution mère doit être injectée dans 4 h ce qui conduit à un débit d'injection de :

Q = 510 l / 4 h = 127,5 l/h
On réglera le débit de la pompe doseuse à 130 l/h

Concentration de la solution mère = 173 Kg / 510 l = 0,34 g/l

Taux d'injection = débit de la pompe doseuse (l/h) / débit d'irrigation (m^3/h)
soit : 130/20 = 6,5 l/m^3

Salinité de l'irrigation = 0,34 x 6,5 = 2,2 g/l, valeur correcte.

Préparation de la solution mère :

On verse dans l'ordre : l'eau, le phosphore mono - ammoniaque, le nitrate de potasse et l'ammonitrate.

Poids des engrais à dissoudre :

-Phosphore mono-ammoniaque = 16,4 kg avec une solubilité de 37 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 16,4 / 37 = 44 l

-Nitrate de potasse = 28,3 kg avec une solubilité de 31,6 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 28,3 / 31,6 = 90 l

-Ammonitrate = 13 kg avec une solubilité de 192 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 13 / 192 = 7 l

- Quantité totale est de 57,7 Kg.

- Volume total d'eau est de 141 l.

Le poids total d'engrais nécessaire pour l'ensemble du poste d'irrigation de 3 ha sera de:

Phosphate mono-ammoniaque	16,4x 3 = 49,2 Kg
Nitrate de potasse	28,3 x 3 = 84,9 Kg
Ammonitrate	13 x 3 = 39 Kg soit au total = 173,1 Kg

Par mesure de sécurité, le volume d'eau calculé sera majoré de 20% soit 170 l/ha.

Pour les 3 ha on aura besoin d'une quantité de solution mère est de 510 l.

Le débit d'irrigation est de 6,7 m^3/h/ha x 3 = 20 m^3/h.

Conclusion Générale

L'adoption d'une approche globale de gestion de l'eau en oléiculture est nécessaire ; elle exige que des mesures soient prises à tous les niveaux de gestion de l'eau, depuis les cultures jusqu'aux systèmes économiques et ce dans le but de relever les défis que pose déjà la pénurie de l'eau en Tunisie.

Au niveau de la parcelle, une irrigation bien maîtrisée permet de s'affranchir des conditions difficiles, mais l'installation doit être performante et les apports d'eau réfléchis afin d'éviter les pertes.

L'irrigation apporte une amélioration conséquente de l'efficience de l'irrigation et assure une meilleure valorisation des terres à travers la densification des cultures et/ou leur intensification et la diversification de la production. Cependant, compte tenu de l'interdépendance des conditions de cultures, il est nécessaire de connaitre tous les paramètres influents, en particulier les besoins en eau de la culture en fonction de l'évolution de son développement.

Ce manuel a présenté une masse de données qui permettent à l'oléiculteur averti de gérer au mieux l'eau au niveau de sa parcelle en tenant compte des contraintes techniques qu'il peut rencontrer. Cependant **l'oléiculteur doit nécessairement considérer l'irrigation comme une des composantes du paquet technique appliqué (taille, fertilisation, travail du sol, traitements phytosanitaires, récolte, …etc.) et non pas la seule.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abid-Karray, J., 2006. Bilan hydrique d'un système de cultures intercalaires (Olivier – Culture maraîchère) en Tunisie Centrale : Approche expérimentale et essai de modélisation. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. 172 pages.

Allen, G., Pereira, S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration, Guideline for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper 56. FAO. Rome.

Bandino, G., Dettori, S., 2003. Manuale di olivicultura. Consorzio Interprovinciale per la Frutticoltura Cagliari. Oristano. Nuoro. Regione Autonoma della Sardegna.

Bahri-Haddad, A., 1981. Distribution des sels dans les sols en fonction de différentes techniques d'irrigation. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Bahri, A., 1982. Utilisation des eaux et des sols chargés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Doctorat Ing. Toulouse. 102 pages + Annexes.

Ben Mechlia, N., Hamrouni, A., 1978. Alternance et production potentielle chez l'olivier irrigué. Séminaire International sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia. 3-7 Juillet 1978. pp. 199-208.

Braham, M., 1997. Activité Ecophysiologique, état nutritif et croissance de l'olivier soumis à une contrainte hydrique. Thèse de Doctorat. Université de Gant. 233 pages.

Cabibel, B., 1991. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré. Agronomie 11 : 877-887.

Cabibel, B., Do F., 1991 a. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. Agronomie 11: 669-678.

Cabibel, B., Do F., 1991 b. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. II. Evolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. Agronomie 11 : 757-766.

Cabibel, B., Isbérie C., 1997. Flux de sève et alimentation hydrique de cerisiers irrigués ou non en localisation. Agronomie 17, 97-112.

Caspari, H.W., Green, S.R., Edwards, W.R.N., 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse and estimated by a Penman-Monteith model. Agric. For. Meteorololy. 67, 13-27.

CEMAGREF, 1990. Guide pratique. Irrigation. Document élaboré par le groupe mixte CEMAGREF-DICOVA, CEP-France Agricole et RNED-HA. Edition CEMAGREF-DICOVA. p 319.

CEMAGREF, 1995. La conduite de l'irrigation. De la stratégie au pilotage de l'irrigation. Groupe 'Pilotage de l'Irrigation' RNED-AFEID-ANDA. Réseau National, Expérimentation, Démonstration, Secteur hydraulique agricole. Ed. V. Goulette, J. Baudet, Louis-Jean. 124 pages

Châabouni, M., 1982. L'économie de l'eau et les systèmes d'irrigation sur oliviers dans les conditions arides de la Tunisie. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture, Tunisie, Octobre 1982.

Chehab, H., 2007. Etude écophysiologique, agronomique, de production et relation source-puits chez l'Olivier de table en rapport avec les besoins en eau. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Institut National Agronomique de Tunisie.

Clothier, B.E., Green, S.R., 1994. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. Agric. Water Management. 25 :1-12.

Cohen, Y., 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorology approach. Irrig. Sci., Vol 12, pp 93-98.

Clothier B.E., Green S.R., 1994. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. Agric. Water Management. 25: 1-12.

COI, 1997. L'olivier, Encyclopédie Mondiale de l'Olivier, Ed., Plaza and Janéf, 479 p.

Connor, D.J., Fereres, E., 2005. The Physiology of adaptation and yield expression in Olive. Horticultural Review, Volume 31, Edited by Jules Janick.

Connor, D.J., 2006. Towards optimal designs for hedgerow olive orchards. Australian Journal of Agricultural Research, 57, 1067-1072.

Cottenie, A., Verloo, M., Kiekens, L., Camerlynck, R., Velghe, G., Dhaese, A., 1983. Essential and non essential trace elements in the system soil – water - plant. Laboratory of analytical and agrochemistry state university. Gent-Belgium. 217 pages.

Cruiziat, P.,Tyree, M.T., 1990. La montée de la sève dans les arbres. La Recherche, N°220.

Cruz-Conde Suarez de Tangil, J., Fuentes-Cabanas, M., 1989. Irrigation goutte à goutte de l'oliveraie : doses d'eau. Olivae 25, pp 24-25.

CTIFL, 1999. Tensiométrie. Outils de pilotage. Bonnes pratiques en arboriculture fruitière. Fiche technique n°14. p 178.

Deidda, P., Dettorio, S., Filighueddu, M.R., Virdis, F., Pala, M., 1990. Lysimetric analysis of water requirements for young table - olive trees. Acta Horticulturae 286: 259-261. Et Olea 20, Page 73.

Dettori, S., 1987. Estimacion con los metodos de la F.A.O. de las necesidades de riego de los cultivos de aceitunas de mesa de Cerdena. Olivae 17 : 30-35.

Dettori, S., Russo, G., 1993. Influence du cultivar et du régime hydrique sur le volume de production et la qualité de l'huile d'olive. Revue OLIVEA 49 : 36-42.

Dichio, B., Romano, M., Nuzzo, V., Xiloyannis, C., 2002. Soil water availability and relationship between canopy and roots in young olive trees (Cv. Coratina). Acta Horticulturae 586 : 255-258.

Do, F., Rocheteau, A., Grouzis, M., 1998. Flux de sève et consommation en eau d'Acacia tortillis dans le Nord Ferlo. Dans « L'acacia au Sénégal » Orstom - Isra, 3-5 Décembre 1996, Dakar (Sénégal). Collection Colloques et Séminaires, 63-80.

Do, F., Rocheteau, A., 2002 a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. Tree physiology 22: 641-648.

Do, F., Rocheteau, A., 2002 b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. Tree physiology 22: 679-654.

Do, F., Rocheteau, A., 2003. Cycle annuel de transpiration d'Acacia raddiana par la mesure des flux de sève brute (Nord-Sénégal). In Un arbre au désert Acacia raddiana, Editeurs scientifiques Grouzis M., et Le Floc'h E., IRD Editions, 119-142.

El Amami, S., 1984. Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. PUB CRGR. 40 pages plus annexes.

FAO, 1976. Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'Irrigation et de Drainage 24.

FAO, 1986. Yield response to water. Bulletin d'Irrigation et de Drainage 33: 105-108.

FAO, 1987. Les besoins en eaux d'irrigation. Manuel de formation N°3.

FAO, 1989. Pilotage des irrigations. Manuel de formation N°4.

Fernandez, J.E., Moreno F., Martin-Aranda J., 1990. Study of root dynamics of olive trees under drip irrigation and dry farming. Acta Horticulturae 286:263-266.

Fernandez, J.E., Moreno F., Cabrera F., Arrue J.L., Martin-Aranda J., 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. Plant and soil 133:239-251.

Fernandez, J.E., Moreno, F., 1999. Water use by the olive tree. Journal of crop production, Vol. 2, N°2: 101-162.

Fernandez, J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Giron, I.F., Moreno F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnosis of water stress. Agriculture water Management, vol. 51, Issue 2, pp 99-123.

Fernandez, J.E., Paloma, M.J., Diaz-Espejo, A., Giron, I.F., 2003. Influence of partial soil wetting on water relation parameters of the olive tree. Agronomie 23: 545-552.

Fernandes Serrano, J.M., Vincent Abela, M., 1982. Premiers résultats de l'essai d'irrigation goutte à goutte sur la variété Galega vulgar. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture, Tunisie, Octobre 1982. Olea - juin 1984.

Gargouri, K., Mhiri, A., 2003. Relationship between soil fertility, phosphorus and potassium nutrition of the olive in Tunisia. Options Méditerranéennes, 50: 199-204.

Gargouri, K., 2012. Programme de ferti-irrigation d'une parcelle d'olivier selon l'âge. Présenté à l'occasion de la journée de formation adressée aux ingénieurs des CRDA. Ben Arous 2010.

Gendrier, J.P., Lichou, J., Baudry, O., Orts, R., Rondeau, S., Soing P., Mandrin, J.F., 1999. Outils de pilotage. Bonnes pratiques en arboriculture fruitière. Edition CTIFEL-ACTA. www.ctifel.fr. 202 p.

Giorio, G., D'Andria, R., 2002. Sap flow estimated by compensation heart-pulse velocity technique in olive trees under two irrigation regimes in Southern Italy. Acta Horticulturae. 586: 401- 404.

Goldhamer, A., Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Irrig. Sci. 20: 115-125.

Giorgio, P., Giorgio, G., 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse by continuous of a single gauge. Environmental an Experimental Botany 49, Issue 1: 9-20.

Goldhamer, D.A., Dunai, J., Ferguson, L., 1993. Water use requirements of Manzanillo olives and reponses to sustained deficit irrigation. Acta Hortic. 335, 365-371.

Gouard, P., 1975. L'irrigation de l'olivier: présent et avenir. Revue Olea. Décembre 1975, pp 26-52.

Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci.For. 42 (2): 193-200.

Granier, A., 1987 a. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology 3 : 309-320.

Granier, A., 1987 b. Mesure de flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Ann. Sci. For. 44 (1) : 1-14

Granier, A., Huc R., Barigah, S.T., 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. Agricultural and Forest Meteorology 78: 19-29.

Granier, A., Biron, P., Lemoine D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in tow beech stands. Agricultural and Forest Meteorology 100, 291-308.

Green, S.R., 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. Agricultural and Forest Meteorology, 64, 201-221.

Green, S.R., Clothier, B.E., 1988. Water use of Kiwi fruit vines and apple trees by the heat - pulse technique. J. Exp. Bot. 39 : 115-123.

Habaieb, H., Masmoudi-Charfi, C., 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées en Tunisie : Estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques. Cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte ». Sécheresse 14 (4) : 1-9. Décembre 2003.

Inglese, P., Barone, E., Gullo, G., 1996. The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening patter and soil characteristics of olive (Olea europaea L.) Cv. Carolea. Journal of Horticultural Science 71 (2): 257-263.

Institut de l'Olivier, 1994. Techniques de plantation de l'olivier. Série document technique n°2, 1994.

Kostner, B., Granier, A., Cermak, J., 1998. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Ann. Sci. For., 55: 13-27.

Mahjoub, I., 2004. Développement d'un dispositif de mesure du flux de sève des arbres. Projet de Fin d'Etude de l'INAT. 48 pages.

Masmoudi-Charfi, C., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., 2004 a. Irrigation de l'olivier : Cas des jeunes plantations intensives. Revue Ezzaitouna Vol 10 (1 et 2) : 37-51.

Masmoudi, M.M., Mahjoub, I., Masmoudi-Charfi, C., Karray-Abid, J., Ben Mechlia, N., 2004 b. Mise au point d'un dispositif de mesure du flux de sève xylémique chez l'olivier. Actes du Séminaire International : Aridoculture et Cultures Oasiennes. Numéro Spécial de la Revue de l'IRA. pp. 242-251. Djerba 22-25 Novembre 2004.

Masmoudi-Charfi, C., Msallem, M., Say, M.B., 2006. Plantations irriguées d'olivier. Document Technique n°2. Institut de l'olivier. 7 pages en langue arabe.

Masmoudi-Charfi, C., 2006. Gestion de l'irrigation dans les plantations d'olivier. Document Technique n° 3. Institut de l'olivier.13 pages en langue arabe.

Masmoudi, M.M., Masmoudi-Charfi, C., Mahjoub, I., Ben Mechlia, N., 2007. Water requirements of individual olive trees in relation to canopy and root development. Wasamed Project. Options Méditerranéennes. Proceedings of the International Conference on water harvesting in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs. 14-17 February 2007. Valenzano Italy. pp 73-80.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2007. Characterization of young olive trees growth during the first six years of cultivation. Adv. Hort. Sci. 21(2): 116-124.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. Adv. Hort. Sci. 22 (1): 8-12.

Masmoudi-Charfi, C., 2008. Caractérisation et modélisation de la croissance de l'olivier (Olea europaea L.) en rapport avec son alimentation en eau. Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques (PhD). Institut National Agronomique de Tunisie. 323 pages.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2009. Mineral uptakes of macro-nutrients in Tunisian olive (*Olea europaea* L.) orchards during the first years after plantation. Adv. Hort. Sci., 2009 23(4): 211-218

Masmoudi-Charfi, C., Karray-Abid, J., Mahjoub I., Masmoudi, M., Ben Mechlia, N., 2010. Gestion de l'eau dans les jeunes plantations d'olivier à travers la détermination du flux de sève xylémique. Séminaire National organisé dans le cadre des activités du LAPOAF et de l'avancement des travaux du projet Tuniso–Belge ZEIN2006PR32: Gestion des plantations d'olivier de table selon le concept « source – puits » et pilotage de l'irrigation en fonction de l'état hydrique et nutritionnel de l'arbre. Sousse - Juin 2010.

Masmoudi-Charfi, C., Masmoudi, M.M., Karray-Abid, J., Ben Mechlia, N., 2011. Sap flow Measurements in Young Olive Trees (Olea europaea L.) cv. 'Chétoui' Under

Tunisian Conditions. Accepté pour publication dans la Revue Scientia Horticulturae. Impact factor 1,2 (pour 2011).

Masmoudi-Charfi, C., Msallem, M., Kharrat, M., Larbi, A., Ben Dhiab, A., Bayoudh, C., 2011. Mise en place d'une oliveraie. Document technique élaboré dans le cadre des activités de la commission Nord pour la promotion du secteur oléicole. Edition AVFA. 20 pages.

Massai, R., Remorini, D., Ferreira, M.I., Paço, T.A., 2000. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. Proc. 3rd IS on Irrigation Hort. Crops. Eds Ferreira et Jones. Acta Hort. 537.

Mekki, H., 2009. La politique de l'eau en Tunisie. Conférence régionale sur la gouvernance de l'eau. Echange d'expériences entre L'OCDE et les pays arabes. CITET – Tunis, 8-9 Juillet 2009.

Michelakis, N., 1986. Olive behaviour under various irrigation conditions. Olea 17, pp 207-209.

Michelakis, N., Vouyoucalou, E., 1988. Water use, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. Olea 19, pp 17-31.

Michelakis, N., 1990. Yield response of table and oil olive tree varieties to different water doses under drip irrigation. Acta Horticulturae 286, pp: 271-274.

Michelakis, N., 1995. Effet des disponibilités en eau sur la croissance et le rendement des oliviers. Olivae 56: 29-39.

Michelakis, N., 1996. Water use and soil moisture depletion by olive trees under different irrigation conditions. Agricultural water management. Volume 29, Issue 3.

Michelakis, N., 2000. Water requirements of olive tree on the various vegetative stages. Proceedings of the International course on water management and irrigation of olive orchards. Cyprus. Avril 2000.

Michelakis, N., Vougioucalou E., 1988. Water use, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. Olea 19: 17-31.

Michelakis, N., Vouyoucalou, E., Clpaki, G., 1993. Plant growth and yield response of the olive tree cv., Kalamon for different levels of soil water potential and method of irrigation. Olea (22).

Moreno, F., Fernandez, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R., 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. Plant and Soil 184: 85-96.

Moriana, A.F., Villalobos, J., Fereres, E., 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (Olea europaea L.) leaves to water deficits. Plant Cell Environment 25: 395-405.

Moriana, A.F., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield response of a mature olive orchard to water deficits. Journal of the American Society for Horticultural Science 128: 425-431.

Moriana, A.F., Perez-Lopez, D., Gomez-Rio, A., Salvador, M., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G., 2006. Irrigation scheduling for traditional low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics.

Nasr, Z., 1987. Une nouvelle technique de pilotage de l'irrigation des arbres : Mesure du flux de la sève par des méthodes thermiques. Mémoire de fin d'études du 2ème cycle de l'INAT. 70 Pages.

Nicolas, E., Torreciallas, A., Ortuno, M.F., Domingo, R., Alarcon, J.J., 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. Agr. Water Manag. Vol. 72: 131-145.

Nuberg, I., Yunusa, I., 2003. Olive water use and yield. Report for the rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No 03/048. RIRDC Project No UA-47A.

Laouer, S., 1978. Quelques aspects de l'économie de l'eau chez l'olivier en conditions variables d'alimentation hydrique. Séminaire sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia, Tunisie, pp. 105-116.

Larbi A., 2010. Création d'un verger oléicole**.** Communication présentée à l'occasion de la journée de formation pour les CRDA du Nord. Avril 2011.

Lavee, S., 1997. Biology and Physiology of the olive. In World Olive Encyclopedia. Ed. C.O.I., pp. 59-110.

Le Bourdelles, J., 1977. Irrigation par goutte à goutte en Oléiculture. Principe de la méthode, Installations et Fonctionnement. Olea, Juin 1977.

Le Bourdelles, J., 1982. L'eau en Oléiculture. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Le Bourdelles, J., 1984. Activités du sous réseau sur l'utilisation de l'eau en Oléiculture. Résultats obtenus et Orientations nouvelles de la recherche. Réunion commémorative du 10ème Anniversaire du Réseau Coopératif Européen de Recherche en Oléiculture, 5 pages.

Llamas, J.F., 1984. Basis of fertilization in olive cultivation and the olive tree's vegetative cycle and nutritional needs. International Course on the fertilization and intensive cultivation of the Olive. Cordoba. pp. 1 - 25.

Loussert, R., Brousse, G., 1978. L'Olivier. Techniques Méditerranéennes et Productions Agricoles Tome 1. G.P. Maisonneuve et Larose, Paris. Tome 1.

Lousteau, D., Granier, A. El hadj Moussa, M., 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. Ann. For. Sci. 21: 599-618.

Lu, P., Urban, L. Zhao, P., 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica 46 (6): 631-646.

ONH., 2006. Journées d'étude relatives au développement de l'oléiculture à huile. 19-20 Décembre 2006. Tunis.

Ozyilmaz, H., Ozkara, M., 1989. Determination of water consumption of the olive tree in the field conditions. Olea n°20, page 78.

Palese, A.M., Nuzzo, V., Dichio, B., Celano, G., Romano, M., Xiloyannis, C., Ferreira, M.I., Jones, H.G., 2000. The influence of soil water content on root density in young olive trees. Acta Hort. 537: 329-336.

Palomo, M.J., Diaz-Espejo, A., Fernandez, J.E., Giron, I.F., Moreno, F., 1998. Using sap flow measurements to quantify water consumption in the olive tree. Water and Environment, Innovative issues in Irrigation and drainage, Ed. Luis S. Pereira and J. W. Gowing, 205-212.

Palomo, M.J., Moreno, F., Fernandez, J.E., Diaz-Espejo, A., Giron, I.F., 2002. Determining water consumptive in olive orchards using the water balance approach. Agr. Wat. Mang. Vol 55, Issue 1, 15-35.

Pansiot, F.R., Rebour, H., 1961. Improvement in olive cultivation. Ed. FAO, 249 Pages.

Pansiot, F.R., 1977. La pratique de l'irrigation dans l'oliveraie. Manuel d'Oléiculture. pp 147-164.

Pastor, M., Orgaz, F., 1994. Riego deficitario del olivar. Agricultura 746: 768-776.

Pastor, M., Hodalgo, J., Vega, V., Castro, J., 1998. Irrigation des cultures oléicoles dans la région de la LOMA (Province de Jaén). Olivae n°71.

Phocaides, A., 2008. Manuel des techniques d'irrigation sous pression. FAO - Seconde Edition.

Piedra, P.A., Humanes, G.J., Munoz-Cobo, P., Martin, S., 1997. Plantations à haute densité. Concepts nécessaires. Olivae 69, Décembre 1997.

Poli, M., 1979. Etude bibliographique de la physiologie de l'alternance de production chez l'olivier (Olea europaea L.), Fruits 34 : 687-695.

Psyllakis, N., 1973. Recherches de tests pour l'aptitude des variétés d'olivier à la culture irriguée. Application aux variétés Koroneiki et Mastoidis. Rapport du Réseau de recherches sur la bioclimatologie de l'olivier.

Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. European Journal of Agronomy 13: 125-153.

Rallo, L., 1998. Fructification y produccion, In El Cultivo del olivo. Junta de Andalucia y Grupo Mundi-Prensa, pp: 107-136.

Rallo, P., Rapoport, H.F., 2001. Early growth and development of the olive fruit mesocarp. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 76 (4): 408-412.

Rejeb, S., Bouaziz, E., 1981. Etude de la nutrition minérale de l'olivier irrigué à l'eau saumâtre. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie. Octobre 1982.

Rhaiem, H., 1971. Etude du bilan hydrique sur olivier en culture sèche. Bulletin ENSAT, pp 28-29.

Riou, C., 1978. Quelques aspects du bilan hydrique d'une plantation d'oliviers. In: Séminaire sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia 1978. pp. 101-104. Ed. O.N.H.

Romano, M.E., 1977. L'irrigation de l'olivier. Manuel d'Oléiculture. Chapitre 7, pages 137-146. Doc F.A.O. pour l'alimentation et l'agriculture.

Samish, R.H., Spiegel, P.,1966. L'influence de l'irrigation sur la croissance de l'Olivier pour la production d'huile. Informations Oléicoles Internationales 34 : 53-63.

Sanz-Cortès, F., Martinez-Calvo, M.L., Badenes, H., Bleiholder, H., Hack, G., Llacer Meier U., 2002. Phenological growth stages of olive trees (Olea europaea). Ann. Appl. Biol., 140:151-157.

Smith, D.M., Allen, S.J., 1996. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, Vol 47, No. 305, pp. 1833-1844.

Snane, M.H., Toumi, M., Chaabouni, Z., 1991. Un modèle d'optimisation des pluies pour les oliveraies. Revue Sécheresse 2: 12-16.

Stylianou, Y., Metochis, C., 1982. Expériences sur l'irrigation des oliviers à Chypre. Institut pour la Recherche Agricole Nicosie, Chypre. 1977-1981. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Sole-Riera, M.A., 1989. The influence of auxilary drip irrigation with low quantities of water on olive trees in Las Garrigas (Cv Arbequina). Revue Olea 20, page 86 et Acta Horticulturae 286: 307-310.

Studutto, P., 1996. Water use efficiency. L.S. Pereira *et al.,* (Eds). Sustainability of Irrigated Agriculture, 193-209.

Swanson, R.H., 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. Agricultural and Forest Meteorology 72: 113-132.

Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. Agricultural and Forest Meteorology 121: 1 –18.

Therios, L., 2009. Olives. Crop prodcution Science in Horticulture. Edition Biddles Ltd. King's Lynn. www.cabi.org. 407 pages.

Tiercelin, J.R., 1998. Traité d'irrigation. Edition LAVOISIER. Technique et Documentation. 1011p.

Tron, G., Isbérie, C., Chol, P., 2000. La tensiométrie pour piloter les irrigations. Une gestion raisonnée de la ressource en eau. Edition Educagri. 247 pages.

Vernet, A., Damagnez, J., De Ville, O., 1964. Besoins en eau de l'Olivier et action de l'irrigation sur la production. Influence de la salure. Informations Oléicoles Internationales, 27, pages 11-26.

Vernet, A., Mousset, P., Gouayeb, O., 1970. Alimentation en eau de l'olivier. Séminaire Oléicole National. Sfax 27- 29 Janvier 1970.

Villagra, M.M., Bacchi, O.O.S., Tuon, R.L., Reichardt, K., 1995. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. Agricultural and Forest Meteorology. 72: 317-325.

Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L., Fereres, E., 2000. Measurement and modelling of evapotranpiration of olive (Olea europaea L.,) orchards. European Journal of Agronomy 13: 155-163.

Villemur, P., Delmas, J.M., 1978. Croissance, développement et alternance de production. Séminaire International sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia, 3-7 Juillet 1978.

Xiloyannis, C., Dichio, B., Nuzzo, V., Celano, G., 1999. Defence strategies of olive against water stress. Proceeding of the 3rd International ISHS Symposium on olive growing. Eds. I.T. Metzidakis and D.G., Voyiatzis. Acta Hort. 474, ISHS.

Xiloyannis, C., Celano, G., Palese, A.M., Dichio, B., Nuzzo, V., 2002. Mineral nutrient uptake from the soil in irrigated olive trees, cultivar Coratina over six years after planting.- Acta Horticulturae, 386: 453-456.

Références électroniques

www.afidol.org. Conduite des oliviers. Article d'AFIDOL élaboré dans le cadre du programme Olea 2020.

www.afidoltek.org/index.php/La_conduite_de_l'irrigation

www.afidoltek.org/index.php/Les_besoins_en_eau_de_l'olivier (pluie efficace).

Chapitre 1

GENERALITES

1- Ressources en eau de la Tunisie

Le climat en Tunisie est de type Méditerranéen. Il est caractérisé par une pluviométrie irrégulière, inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Les quantités de pluies reçues annuellement vont de moins de 80 mm au Sud du pays à 1500 mm dans l'extrême Nord, avec une moyenne annuelle de 220 mm (Tableau 1).

Tableau 1. Ressources en eau de la Tunisie.

Ressource	Capacité
Apport pluviométrique moyen	220 mm # 36 Km^3/an
Eau de surface	
Medjerda	1,0 Km^3/an
Bassins du Nord	2,7 Km^3/an
Eau Souterraine	2,2 Km^3/an
Infrastructure hydraulique actuelle	
29 grands barrages	2170 Mm^3/an
223 barrages collinaires	195 Mm^3/an
812 lacs collinaires	135 Mm^3/an
95000 puits de surface équipés	745 Mm^3/an
5000 forages exploités	1420 Mm^3/an
Potentiel des ressources en eau	4865 Mm^3/an
Ressources mobilisables	4665 Mm^3/an

Hamza (2009).

Dans le Nord, le réseau hydrographique est dense. Au Centre et au Sud du pays, les eaux sont essentiellement d'origine souterraine représentées par des aquifères profonds.

2- L'olivier irrigué en Tunisie

L'olivier se trouve partout en Tunisie, mais il est conduit différemment selon la disponibilité de l'eau. Le manque de précipitations dans les régions du Centre et du Sud du pays a poussé les oléiculteurs à adopter des aménagements hydrauliques types Tabia et Jessr pour valoriser l'eau de pluie et/ou de ruissellement (El Amami, 1984 ; Snane, 1991). Dans les régions du Nord, l'agriculteur adopte un système de culture diversifié dans lequel l'olivier bénéficie des apports hydriques à travers l'irrigation de complément ou l'irrigation de cultures annuelles intercalaires (solanacées), le plaçant ainsi en second rang. Cette pratique est à l'origine d'une concurrence accrue entre les espèces cultivées aussi bien pour l'eau que pour les nutriments. Elle est également responsable de l'apparition de maladies cryptogamiques comme celles qui sont occasionnées par les agents de pourriture des racines ou le *verticillium.*

L'olivier irrigué couvre actuellement 66000 ha **(ONH, 2006)**. Cette superficie a connu une évolution lente et bien en dessous des prévisions. Toutefois, des extensions ont été réalisées dans différentes régions du pays, notamment au Kef, à Sidi Bouzid, à Siliana et à Zaghouan en vue d'augmenter et de stabiliser la production nationale qui oscille entre 60000 et 300000 tonnes d'olives/an. Ces fluctuations sont liées au phénomène d'alternance de la production, au manque de suivi et d'entretien de la plantation et à l'application de pratiques horticoles qui ne sont pas toujours adaptées au mode de conduite, en particulier dans les plantations intensives irriguées. L'irrigation, par exemple, est souvent pratiquée de manière empirique par manque de connaissances des besoins réels en eau de l'olivier, dont l'estimation pose le plus d'ambiguïté. Il en résulte des rendements faibles, ne dépassant pas 3T/ha alors que l'efficience de l'utilisation de l'eau oscille entre 0,5 et 1,5 Kg d'olives/m^3 d'eau apporté.

L'utilisation de techniques d'irrigation économes (localisée) et l'encadrement technique des oléiculteurs a permis l'amélioration de la productivité de leur plantation et une meilleure valorisation de l'eau. Malheureusement, ce résultat ne concerne qu'un nombre réduit d'oléiculteurs (certes en augmentation), étant donné que l'irrigation localisée ne concerne actuellement que 20% des plantations irriguées. Un grand nombre d'oléiculteurs continuent, en effet, à pratiquer l'irrigation de surface, qui est à l'origine d'une perte importante d'eau, à laquelle s'ajoute la mauvaise répartition des apports.

De nombreuses questions sont posées à cet effet, que l'on peut résumer en une seule :

Comment gérer l'oliveraie irriguée ?

Ce manuel, met à la disposition de l'agriculteur averti, le technicien, le vulgarisateur…etc. un ensemble de données pratiques qui permettent de mieux gérer, à la fois, la parcelle d'olivier et l'eau disponible. Toutefois, le choix d'une conduite donnée ou d'un système d'irrigation repose sur l'objectif à atteindre. **Par conséquent, on ne peut pas préconiser une conduite générale en raison de la diversité des conditions de culture et des modes d'irrigation. En effet, chaque plantation d'olivier doit être gérée en fonction des conditions locales de culture.**

Chapitre 2

POURQUOI IRRIGUER L'OLIVIER ?

Dans les actes de '*la Consultation sur l'Irrigation en Afrique'* entamé à Togo en 1997 **(Phocaides, 2008)**, le terme «irrigation» a été défini comme «*l'application d'eau complémentaire à celle fournie directement par les précipitations naturelles pour la production agricole*».

Les travaux de synthèse publiés en matière d'irrigation de l'olivier **(Gouard, 1975 ; Pansiot, 1977 ; Romano, 1977 ; FAO, 1989 ; Tiercelin, 1998 ; Bandino et Dettori, 2003)** ont montré que l'apport de l'eau pendant des périodes précises de développement de l'arbre et des fruits améliore significativement leurs performances agronomiques.

1- Effet de l'irrigation sur la croissance

L'irrigation raisonnée permet d'augmenter:

- la longueur des pousses de 10 à 30% en moyenne **(Samish et Spiegel, 1966 ; Dettori, 1987 ; Michelakis et Vougioucalou, 1988 ; Mickelakis *et al.*, 1993 ; Mickelakis, 1995 et 1996 ; Sole-Riera, 1989 ; Goldhamer et Fereres, 2001 ; Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008 ; Masmoudi-Charfi, 2008)**.
- l'activité des racines à travers une meilleure nutrition hydrique et minérale de l'arbre **(Fernandez *et al.*, 1990 ; Fernandez *et al.*, 1991 ; Clothier et Green, 1994 ; Palese *et al.*, 2000 ; Dichio *et al.*, 2002)**.

Dans les plantations irriguées, une vague de croissance estivale est observée après le stade de durcissement des noyaux des olives. Elle produit en moyenne 30% de la croissance annuelle des pousses **(Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008)**. Les plantations d'olivier conduites sous un régime pluvial présentent, par contre, seulement deux vagues de croissance, la première est printanière et, la seconde est automnale.

2- Effet de l'irrigation sur la fructification

L'irrigation raisonnée permet d'augmenter:

- le taux de nouaison qui peut atteindre 15% **(Stylianou et Metochis, 1982 ; Fernandez Serrano et Vincent Abela, 1982)**.
- le nombre de sites potentiels de fructification **(Mickelakis, 1986 et 2000)**.
- le calibre des olives et leur nombre de 15 à 40% **(Dettori et Russo, 1993 ; Ozyilamaz et Ozkara, 1989 ; Michelakis, 1990 ; Dettori et Russo, 1993 ; Rallo, 2001)**

L'irrigation assure également un meilleur contrôle de la chute des fruits avec une réduction significative de l'écart de calibre **(Villemur et Delmas, 1978)**. Elle modifie favorablement la date de maturation des olives **(Inglease *et al.*, 1996)**

3- Effet de l'irrigation sur les paramètres de production

L'irrigation raisonnée améliore le rendement en olives et en huile de 20 à 30% **(Vernet, 1964 ; Bahri-Haddad, 1981 ; Bahri, 1982 ; Ben Mechlia et Hamrouni, 1978 ; Chaabouni, 1982 ; Le Bourdelles, 1982 ; Lavee, 1997 ; Sole-Riera, 1989 ; Moriana *et al.*, 2002, 2003 et 2006).**

L'apport de l'eau pendant les phases appropriées de croissance des fruits et de l'arbre permet de mieux contrôler l'alternance de production **(Poli, 1979 ; Michelakis, 2000)** et assure une meilleure reprise des boutures après leur plantation **(Institut de l'Olivier, 1994).**

L'efficience de l'utilisation de l'eau est au moins doublée par rapport au mode pluvial **(Vernet *et al.*, 1970 ; Laouer, 1978 ; Le Bourdelles, 1982 et 1984 ; FAO, 1986 ; Studutto, 1996 ; Nuberg et Yanusa, 2003).** Des valeurs allant de 2,5 à 5,0 Kg d'olives/m^3 d'eau apporté sont obtenues **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011)**.

Compte tenu de ces atouts, il est aujourd'hui de mise pour des raisons de rendement essentiellement, de pratiquer l'irrigation, mais de manière rationnelle pour maintenir la demande en eau à un niveau compatible avec les quantités disponibles et assurer l'équilibre entre la production et le développement végétatif.

Chapitre 3

L'EAU DANS LE SOL (RAPPELS)

1- Déplacement de l'eau dans le sol

Dans le sol, l'eau se déplace de proche en proche des zones humides vers les zones plus sèches. Son déplacement est multidirectionnel. Il est influencé par les caractéristiques du sol (profondeur, texture, porosité), celles du sous-sol et celles de la plante (systèmes radiculaire et aérien). Dans les sols tassés, compactes et à forte teneur en argile, l'écoulement de l'eau est lent, contrairement aux sols de texture légère qui sont dotés d'un pouvoir de filtration plus élevé.

2- Caractérisation de l'état de l'eau dans le sol

L'eau adhère aux particules du sol par une force dite **la tension superficielle** dont l'effet est plus ou moins important selon les caractéristiques du sol, la quantité d'eau présente dans la zone des racines et sa qualité. La tension superficielle est une 'pression négative' mesurée en *bar* à l'aide d'un **tensiomètre.** Elle est d'autant 'plus élevée' que l'eau est liée aux particules de sol et que celles-ci sont fines et compactées. La présence de sels renforce cette tension en créant une autre force appelée **la pression osmotique.** Ces forces ont pour 'effet' de limiter la mobilité de l'eau et donc sa disponibilité à la plante. Pour pouvoir absorber l'eau, les racines devront développer une force contraire dite **la succion radiculaire** qui doit être suffisamment élevée pour vaincre l'ensemble des pressions exercées par le sol.

3- Notions fondamentales

L'eau perdue par la plante lors de sa transpiration sous l'effet de la demande climatique doit être restituée pour que la culture puisse continuer à végéter et à produire. Cette eau est puisée par les racines dans les réserves du sol. La quantité d'eau disponible à la plante s'appelle **la réserve utile (RU).** Elle est exprimée en millimètre d'eau (mm) et est définie par la différence entre l'humidité du **point de ressuyage** et **celle du point de flétrissement,** *c.-à-d.* l'humidité mesurée à la capacité au champ et celle qui est mesurée au point de flétrissement permanent.

L'humidité à la capacité au champ (θ_{cc}) est l'humidité d'un sol ressuyé dans des conditions où le drainage est assuré librement. Le sol est théoriquement plein. Elle est mesurée à 1/3 bar.

L'humidité au point de flétrissement permanent (θ_{pfp}) est mesurée au laboratoire à 15 bars. C'est l'humidité du sol pour laquelle l'eau est retenue avec une intensité supérieure aux forces de succion des racines et dans ce cas, l'eau n'est pas accessible à la plante.

Au delà du point de ressuyage, le sol est saturé en eau ; la plante peut se trouver en situation d'asphyxie. En deçà du point de flétrissement, la plante ne peut plus absorber l'eau.

La **figure 1** donne un ordre de grandeur de la réserve utile du sol en fonction de sa texture.

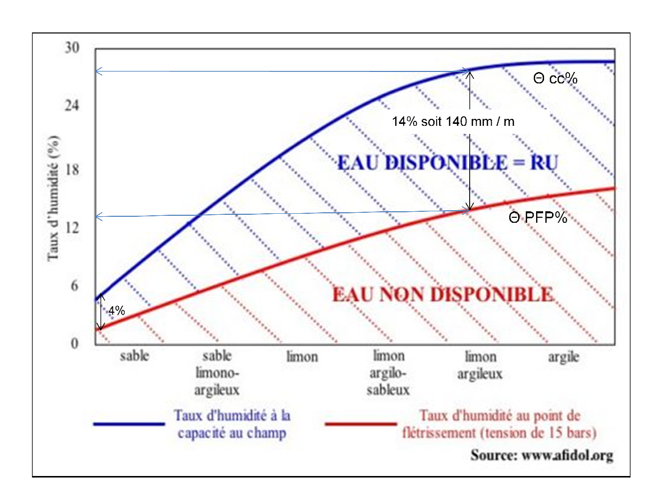


Fig.1. Ordre de grandeur de la réserve utile du sol (RU, mm) pour différentes textures. **(www.afidol.org, Adapté par Buckman et Brady, 1965).**

La réserve utile est exprimée par : $RU = (\theta_{cc} - \theta_{pfp}) \times d_a \times D$

Avec d_a la densité apparente du sol (g/cm^3) et D est la profondeur des racines (m).

Le **tableau 2** donne une lecture de RU pour 1 m de profondeur de sol en fonction de sa nature.

Tableau 2. Ordre de grandeur de RU (mm/m) en fonction de la texture du sol.

Texture	Valeur moyenne de la réserve utile (mm/m)
Sableux	30
Argilo-sableux	120
Sablo-argileux	135
Argile-sableuse	170
Argile	180
Argile-limoneuse	180
Limon sablo-argileux	190
Limon argileux	220
Tourbes	350

CEMAGREF (1995).

Les sols sableux ont une forte proportion en éléments grossiers et une faible capacité de rétention de l'eau. Les sols argileux et riches en matière organique et en humus emmagasinent d'importantes quantités d'eau de part leur forte proportion en particules fines, mais ceci n'implique pas nécessairement une plus grande disponibilité de cette eau à la plante.

La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau accessible à la plante sans difficultés (Fig.2). C'est une fraction de RU. La valeur de RFU représente 30% à 60% RU en fonction du type de sol, de la plante, de la profondeur de ses racines, des conditions climatiques et du mode d'irrigation **(FAO, 1976 ; Allen *et al.*, 1998 ; Gendrier *et al.*, 1999).** Ce pourcentage est noté (p) et exprime **le degré de tarissement de l'eau dans le sol.**

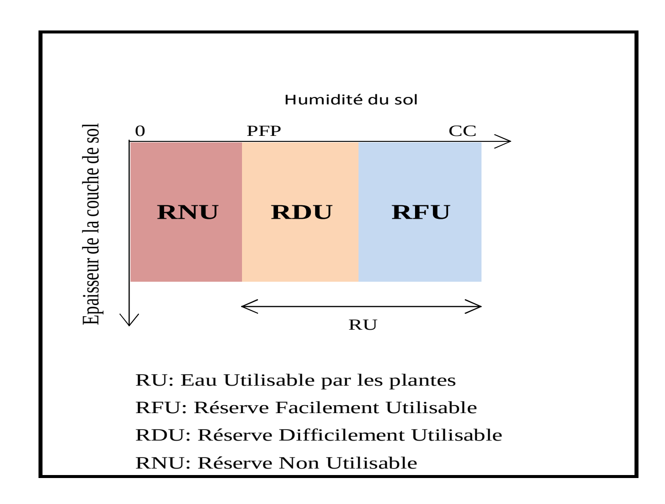


Fig.2. Représentation schématique des composantes de la réserve en eau du sol.

-Les observations de terrain ont montré que moins le tarissement en eau était important, plus l'eau était disponible aux cultures et plus élevés sont leurs développement et rendement.
-Lorsque RFU est consommée, la plante puise dans **la réserve difficilement utilisable** (RDU) si elle le peut ; elle ferme alors en partie ses stomates.
-Lorsque le sol atteint son point de flétrissement permanent, les racines ne peuvent plus absorber l'eau et les plantes finissent par flétrir.

Le tableau ci-dessous présente un ordre de grandeur de quelques paramètres du sol en fonction de sa texture.

Tableau 3. Valeurs de quelques propriétés physiques du sol en fonction de sa texture

	Texture lourde (fine)	**Texture moyenne**	**Texture légère (grossière)**
Humidité de saturation	55-65%	35-45%	25-35%
Humidité à la capacité au champ	32-42%	18-26%	8-10%
Humidité au Point de flétrissement	20-24%	10-14%	4-5%
θ_{cc}/θ_{pfp}	1,75/1	1,85/1	2/1
Densité apparente du sol (d_a, g/cm^3)	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6
Tension du sol à la capacité au champ (bar)	0,3	0,2	0,1
Tension du sol au point de flétrissement permanent (bar)	15,0	15,0	15,0
Temps requis pour passer de la saturation à la capacité au champ (h)	36-89	24-36	18-24
Taux d'infiltration (mm/h)	2-6	83-16	25-75

Phocaides (2008)

Selon les données disponibles, la réserve utile peut être déterminée en utilisant la valeur de la capacité au champ (Application 1) ou à partir du triangle des textures (Fig.3, Application 2).

Application 1

Détermination de la quantité d'eau retenue dans une couche de sol à partir de sa capacité au champ.

Données:

La capacité au champ (θ_{cc}) d'une couche de sol de 45 cm est de 18%.
Le rapport θ_{cc} / θ_{pfp} = 1,85.
La densité apparente du sol est d_a = 1,2 g/cm^3

Question:

Quelles est la quantité d'eau S_a retenue dans cette couche de sol en m^3/ha ?

Réponse:

θ_{cc} = 18%,
$\theta_{pfp} = \theta_{cc} / 1{,}85 = 9{,}7\%$
$\theta_{cc} - \theta_{pfp} = 18\% - 9{,}7\% = 8{,}3\%$
RU = 8,3 x 1,2 x 10 = 99,6 mm/m

Pour une profondeur de 45 cm, la réserve du sol est de:

S_a (mm) = 8,3 x 1,2 x 10 x 0,45 = 44,8 mm soit 448 m^3/ha

Application 2

Détermination de la réserve utile du sol (RU, mm) à partir du triangle des textures.

Données:

Un sol caillouteux présentant 45% de terre fine sur un horizon de 50 cm de profondeur.
La terre fine est constituée de 28% d'argile, 55% de limon et 17% de sable.

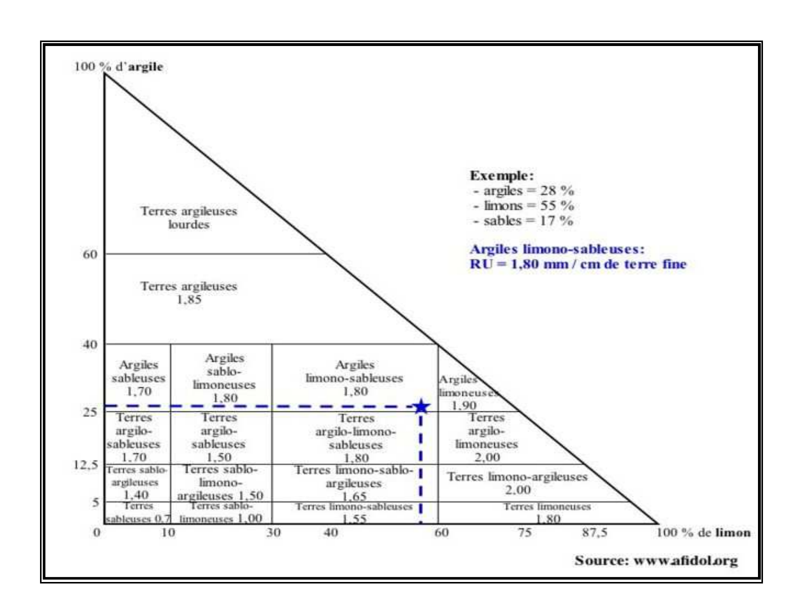


Fig.3. Triangle des textures.
(www.afidol.org)

Question:

Quelle est la valeur de RU sur cet horizon ?

Réponse:

D'après le triangle de texture (Fig.3), cet horizon correspond à des argiles limono-sableuses dont la RU s'élève à 1,80 mm d'eau par cm de terre fine.
Le sol est constitué de 45% de terre fine, la RU est de 0,8 mm par cm de sol, valeur obtenue comme suit : 1,80 mm x 0,45 = 0,8 mm.
L'horizon est profond de 50 cm, la RU de l'horizon est de l'ordre de 40 mm d'eau telle que:

$$RU = 0,8 \text{ mm / cm} \times 50 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$$

Ceci est équivalent à 400 m^3 d'eau / ha   puisque 1 mm d'eau = 10 m^3/ ha.

Chapitre 4

CHOIX DES DENSITES DE PLANTATION EN FONCTION DE LA DISPONIBILITE DE L'EAU

L'olivier absorbe l'eau par les poils absorbants des racines en exploitant un volume de sol plus ou moins important selon les conditions de culture. La quantité d'eau absorbée dépend de la demande climatique, des caractéristiques du sol, de l'écartement entre les arbres, de la charge en fruits et de la disponibilité de l'eau, elle-même, dépendante des caractéristiques du sol.

Pour limiter la concurrence hydrique entre les oliviers, l'espacement entre les arbres doit être choisi en fonction de la disponibilité de l'eau. Il est en effet important de considérer ce paramètre comme le premier facteur déterminant dans le choix de l'espacement entre les cultures et le mode d'irrigation **(Loussert et Brousse, 1978 ; Piedra *et al.*, 1997 ; Lavee, 1997 ; Moriana *et al.*, 2006).**

En culture irriguée (permanente), les densités de plantation dans le système intensif classique varient de 204 pieds/ha (7m x 7m) à 278 (6m x 6 m) pieds/ha. Dans le système hyper-intensif, elles peuvent dépasser 1600 pieds/ha.

En culture pluviale, les densités à adopter varient en fonction de la pluviométrie de la région et des possibilités d'irrigation d'appoint.

Le **tableau 4** indique les écartements possibles, à adopter en fonction de la pluviométrie de la région **(Loussert et Brousse, 1978).**

Tableau 4. Ecartement à adopter en fonction de la pluviométrie de la région.

Pluviométrie (mm/an)	Densité à adopter	Ecartement correspondant
P > 500 mm	200-300 pieds / ha	7 m x 7 m jusqu'à 6 m x 6 m
400 mm < P < 500 mm	125 pieds / ha	9 m x 9 m ou 10 m x 8 m
300 mm < P < 400 mm	100 pieds / ha	10 m x 10 m ou 12 m x 8 m
250 mm < P < 300 mm	50-70 pieds / ha	12 m x 12 m jusqu'à 14 m x 14 m
200 mm < P < 250 mm	34 pieds / ha	17 m x 17 m
P < 200 mm	17 pieds / ha	24 m x 24 m

Loussert et Brousse (1978).

Cette classification a été établie en considérant la pluviométrie de la région comme étant la seule ressource en eau. Lorsque l'irrigation est possible, il est possible de passer à une classe supérieure de densités par **la densification de la culture**.

Chapitre 5

MODES D'IRRIGATION EN OLEICULTURE

1- Classification des systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation sont classés d'après Phocaides (2008) selon:

- *La méthode de distribution de l'eau* : irrigation de surface, irrigation localisée ou par aspersion.
- *Le type d'installation* : installation fixe, installation semi-permanente (les conduites principales et secondaires sont permanentes alors que les conduites latérales sont portables) ou portable.
- *La pression de fonctionnement :* c'est la pression hydraulique maximale requise pour le fonctionnement normal du système d'irrigation. Il existe trois systèmes de fonctionnement :

• Systèmes à basse pression : la pression requise varie de 2,0 à 3,5 bars;
• Systèmes à moyenne pression : la pression requise varie de 3,5 à 5,0 bars;
• Systèmes à haute pression: la pression requise est supérieure à 5,0 bars.

En Tunisie deux grands modes d'irrigation sont utilisés dans les plantations d'olivier: l'irrigation gravitaire ou de surface et l'irrigation localisée. L'irrigation par micro-aspersion est utilisée dans quelques plantations où l'olivier est associé aux grandes cultures.

2- Irrigation de surface ou gravitaire

2-1-Principe

L'irrigation de surface ou gravitaire consiste à reconstituer les réserves en eau du sol une fois que celles-ci sont épuisées.

2-2- Convenance

L'irrigation de surface ou gravitaire convient aux terrains à pente inférieure à 1% ou lorsque le sol et (ou) l'eau d'irrigation sont sujets à la salinité.

Ce mode d'irrigation permet le lessivage des sels, *c.-à-d.* leur déplacement en dehors de la zone des racines. Il peut être adopté en sols sableux moyennant un fractionnement de la dose d'irrigation (pouvoir de filtration élevé), mais il ne convient pas aux terrains à forte pente à cause du ruissellement et de l'érosion qu'il peut engendrer.

Pour les jeunes plantations d'oliviers âgées de 1 an et de 2 ans, il est possible d'irriguer soit au moyen d'une citerne et de cuvettes (1,0 à 1,5 m^2), soit en pratiquant l'irrigation localisée dès la mise en place des boutures. Dans les deux cas, la base du tronc doit être protégée par un monticule de terre afin d'éviter l'infiltration de l'eau au niveau du collet, laquelle est à l'origine de la pourriture des racines.

2-3- Distribution de l'eau

L'eau est distribuée par écoulement en couche fine directement à partir des conduites principales et secondaires dans de larges bandes, des rigoles ou des sillons nivelés au moyen d'un tracteur et confectionnés à ciel ouvert parallèlement aux lignes d'oliviers.

- La pente des bandes, rigoles ou sillons doit être supérieure à 3% et réalisée dans le même sens que celle du terrain.
- La profondeur des rigoles et des sillons varie de 10 cm à 15 cm.
- La longueur des bandes ou des rigoles varie de 50 m (sol sableux) à 150 m (sol argileux).
- La largeur des bandes est cadrée par l'aplomb des frondaisons.
- Le nombre de rigoles varie de 3 (sol argileux) à 6 (sol sableux).

2-4- Dose

Dans le cas de l'irrigation gravitaire ou de surface et pour une même plantation, **la fréquence des arrosages est variable** selon la demande en eau (saison) et le stock d'eau emmagasiné dans le sol, alors que **les apports se font à dose fixe (Tableau 5).**

Tableau 5. Doses d'irrigation (m^3/ha) appliquées en irrigation de surface à une plantation d'olivier adulte selon la région et le type de sol

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Annuel
Terre légère du Centre Oliviers sous 250 mm de pluie			500		500	500	500	500	500	3000
Terre à sable fin Pluviométrie de 250 mm			750			750		750	750	3000
Terre profonde, sable fin			1000			1000		1000		3000
Terre légère Zone littorale	500	500	500			500		500	500	3000
Terre profonde, sable fin Olive de conserve sous 400 mm de pluie						500	500	500	500	2000
Terre franche. Olive de conserve sous 400 mm						500	750	750	500	2500
Terre forte. Olive de conserve sous 400 mm						1000		1000	1000	3000

Loussert et Brousse (1978).

La quantité totale d'eau apportée par unité de surface représente la dose brute (mm ou en m^3/ha).

Dose brute = Volume brut / Surface arrosée = Durée x Débit / Surface.

Le volume brut (V_{brut}) par raie est égal au produit du débit à la source par le temps d'irrigation. Pour ce mode d'irrigation, seule une partie de l'eau distribuée est utilisée par la plante. Elle est appelée volume net (V_{Net}). Environ 30% de l'eau apportée en tête de raie est perdue par percolation. Les valeurs usuelles du débit par raie sont de 0,2 à 0,5 litre d'eau /s pour 100 m de longueur de la raie. Pour une raie de 200 m de long, il faut multiplier ces valeurs par 2.

2-5- Avantages et limites

L'irrigation gravitaire ne nécessite pas de technicité. Elle est la moins coûteuse mais également la moins performante. Elle ne permet pas une distribution uniforme de l'eau, en particulier lorsque les bandes ou les rigoles d'irrigation sont de longue portée.

2-6- Efficacité

Les pertes d'eau sont importantes et difficiles à évaluer **(Photo 1). L'efficience de distribution de l'eau varie de 40% à 70% selon l'homogénéité du terrain et sa pente, *c.à.d.* que sur 100 litres d'eau apportés, 40 à 70 litres sont réellement profitables à la plante.**



Photo 1. Irrigation de l'oliveraie à la rigole.
Pertes d'eau et non uniformité de sa distribution.

2-7-Matériel

L'utilisation de conduites cimentées ou en PVC mou d'un diamètre compris entre 10 cm et 15 cm est recommandée pour améliorer les performances de ce mode d'irrigation. L'eau est distribuée de manière plus homogène sans contrecarrer les travaux d'entretien de la parcelle, en réalisant une économie de l'eau d'environ 40%.

2-8- Conclusion

> *« L'irrigation de surface ou gravitaire est la méthode qui demande le plus de travail. Elle est la moins efficace et celle qui gaspille le plus d'eau pour un résultat aléatoire. Elle demeure toutefois la plus utilisée ».*

3- Irrigation localisée

3-1-Principe

L'irrigation localisée repose sur le maintien de la réserve en eau du sol à un niveau déterminé.

3-2-Convenance

C'est le système le plus adapté aux vergers en raison de l'apport ciblé de l'eau, qui est reçue au niveau du volume de sol occupé par la plus grande partie du système radiculaire.

3-3-Distribution de l'eau

L'eau est appliquée séparément à chaque arbre sur une fraction du sol au moyen de goutteurs ou de diffuseurs, en quantité précise et de manière fréquente. L'eau arrivant au champ s'infiltre dans le sol en humectant la zone des racines, verticalement par gravité et latéralement par effet de capillarité. Ce système utilise de faibles débits et de faibles pressions (2 à 3 bars). L'eau est mise sous pression grâce à une unité de pompage ou par l'intermédiaire d'un réservoir d'alimentation en eau situé en amont du champ.

Pour mener à bien l'irrigation localisée, il est nécessaire de:

- maintenir un même volume de sol humide (bulbe) pendant toute la saison d'irrigation.
- démarrer les irrigations sur un sol encore 'frais'.
- éviter les percolations en faisant coïncider les apports d'eau avec les besoins de la plante.

NB: En début de saison, la contribution du sol est supérieure à celle du bulbe humide, par contre, en fin de saison, l'eau du sol s'épuise, seul le bulbe d'eau alimente la plante.

La forme du bulbe humide dépend des caractéristiques du sol et de la quantité d'eau débitée **(Fig.4).** En terre légère et perméable, le bulbe est étroit. L'eau s'infiltre en profondeur. En terre lourde, le bulbe est large et moins profond.

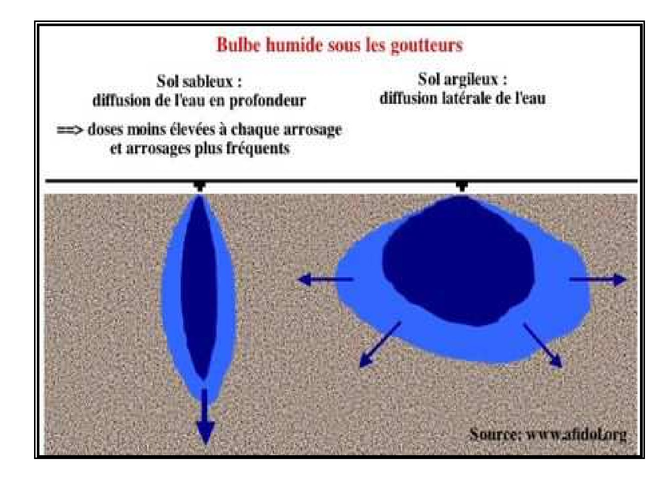


Fig.4. Distribution de l'eau en fonction de la nature du sol en irrigation localisée (**www.afidol.org**).

3-4-Dose et fréquence

Les doses d'irrigation varient en fonction des besoins en eau journaliers de la culture alors que les fréquences sont fixes.

Ce mode d'irrigation impose des apports rapprochés surtout en sols sableux et pendant les périodes de forte demande climatique. Il est important que le bulbe humide ne sèche pas ; de fortes quantités d'eau seront alors nécessaires pour sa reconstitution. Lorsqu'un épisode pluvieux permet de reconstituer plus de la moitié de la réserve facilement utilisable (RFU), l'irrigation peut être suspendue.

3-5-Matériel

Le système d'irrigation localisé est constitué par trois dispositifs pour le fonctionnement, la distribution de l'eau et le contrôle, permettant l'écoulement de l'eau de la station de source vers la parcelle **(Phocaides, 2008).**

Au niveau de la parcelle, le schéma général du système d'irrigation **(Fig.5)** est constitué de conduites enterrées (conduites principales) et de bornes de prise qui émergent à la surface du réseau.
Les bornes sont connectées à de plus petites conduites d'alimentation appelées 'adducteurs' qui, à leur tour, alimentent des conduites latérales posées le long des rangs de la culture et perpendiculairement aux adducteurs.
Ces conduites sont munies de distributeurs posés à intervalles réguliers qui fournissent l'eau uniformément entre les arbres avec une pression donnée.

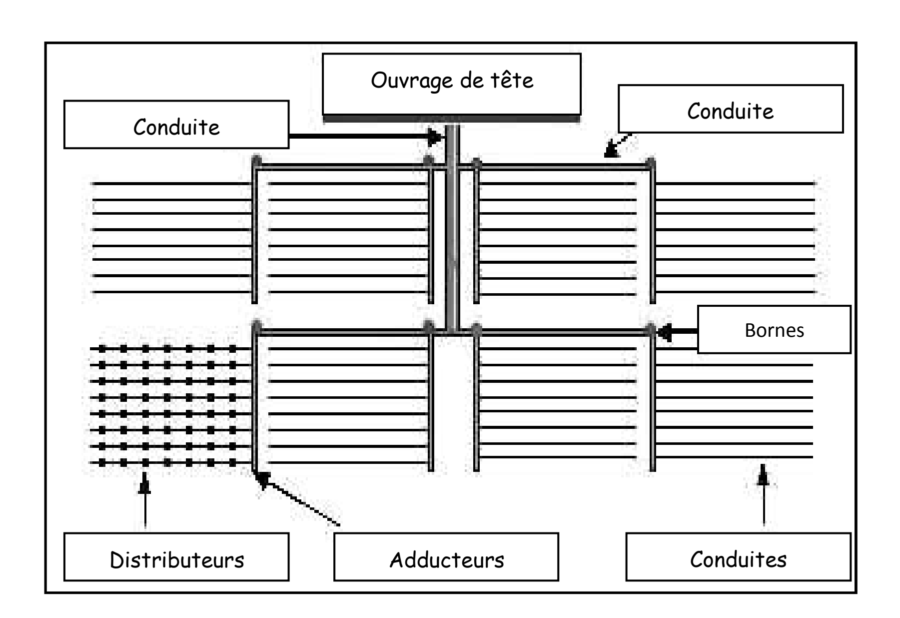


Fig.5. Représentation schématique d'un réseau d'irrigation localisée **(Phocaides, 2008)**

Ouvrage de tête

C'est l'unité de contrôle et de commande. Elle est constituée par une ligne d'alimentation de l'eau en PVC rigide ou acier galvanisé fileté, installée horizontalement à une hauteur minimale de 60 cm au-dessus du sol. Elle est équipée principalement d'un purgeur d'air, d'une valve de contrôle, d'une vanne de sectionnement, d'un injecteur d'engrais et d'une unité de filtration. On y trouve :

- **Tableau de contrôle :** muni de compteurs horaire et métrique et d'un programmateur de fonctionnement automatique.

- **Système de filtres :** à sable, à tamis ou à disques. Le filtre à sable est constitué par un empilement de matériaux plus ou moins fins (0,6-18 mm) selon la charge de l'eau en impuretés. Dans le cas d'une eau chargée, il est recommandé d'utiliser du gravier fin. Le filtre à tamis est généralement monté après le filtre à sable et est utilisé pour filtrer une eau moins chargée. Le filtre à disques est utilisé pour des eaux d'une charge moyenne. Il est généralement associé à un filtre à tamis.

Les faibles sections de passage de l'eau dans les distributeurs imposent l'utilisation d'une eau propre. De ce fait, le niveau de filtration de l'eau va dépendre de son origine :

- Pour les eaux de surface (rivière, lac) il est recommandé d'utiliser des filtres à sable et à tamis.
- Pour les eaux provenant de nappes (puits ou forages), les filtres à tamis sont à privilégier.

La station de filtration est un poste couteux qui s'amortit sur 3 à 4 ha au moins.

- **Mélangeur d'engrais :** C'est une cuve étanche d'une contenance variable (50 à 300 litres) dans laquelle l'engrais, solide mais soluble, est introduit. La cuve est montée en dérivation sur la conduite principale d'irrigation, à l'amont du filtre à tamis. La solution fertilisante ressort par le haut de la cuve et est injectée dans la conduite d'irrigation. Outre son usage pour la ferti-irrigation, ce système est utilisé pour nettoyer les conduites d'irrigation à travers l'injection de produits acides. La pompe doseuse est un appareil qui aspire et refoule alternativement une quantité constante et connue de solution fertilisante dans la conduite d'irrigation. Le fonctionnement du dispositif nécessite une pression minimale de 2 bars.

Conduites et de distribution de l'eau vers le champ

Ce système est constitué par des canalisations primaires, secondaires, des rampes d'irrigation **(Fig.5)** et des bornes de distribution de l'eau. Les conduites primaires véhiculent l'eau de la station de pompage vers les conduites secondaires, qui à leur tour conduisent l'eau vers les rampes d'irrigation, encore appelées portes-distributeurs d'eau. On y trouve les :

- **Conduites principales :** Elles sont généralement enterrées. Leur diamètre varie de 63 à 160 mm selon la dimension de l'exploitation.

-Conduites secondaires : Elles sont branchées sur la conduite principale. Elles sont de même type que les conduites principales.

- **Bornes de prise :** Elles sont branchées sur les conduites principales ou secondaires en amont de la parcelle et permettent la sectorisation de l'irrigation (équipées d'une vanne de sectionnement). Elles fournissent une partie ou la totalité de l'écoulement aux adducteurs.

Les conduites sont placées dans des boites de protection. Elles sont fabriquées en polyéthylène basse et haute pression ou en polypropylène. Ce dernier est utilisé pour les conduites de faible diamètre.



Photo 2. Vanne de distribution /sectionnement de l'eau.

- **Adducteurs** (conduites d'alimentation)**:** ce sont des conduites de diamètre compris entre 50 mm et 75 mm qui sont connectées aux bornes et posées généralement en surface le long des limites de la parcelle pour alimenter les conduites latérales. Tous les types de matériaux à conduites disponibles peuvent convenir pour ces adducteurs.

- **Conduites latérales ou rampes d'irrigation:** ce sont des tuyaux d'irrigation en polyéthylène noir flexible. Ils sont placés à des endroits fixes, le long des lignes de culture et perpendiculairement aux adducteurs.

- **Distributeurs de l'eau** : ils sont insérés dans les rampes à intervalles réguliers. L'eau y entre avec un débit de 1 bar et en ressort sous pression.

* faible débit (1 à 8 l/h): ce sont des goutteurs (photo 3) simples, extensibles ou auto-régulants.
* débit élevé (20 à 60 l/h), l'eau y passe sous forme de jet (mini-diffuseurs ou ajutages calibrés).



Photo 3. Distributeur de l'eau (goutteur) fonctionnant à débit constant et régulier (www.afidol.org).

Parmi les critères de choix des distributeurs **(CEMAGREF, 1995)**:

- Qualité de l'eau d'irrigation: l'eau est d'autant moins bonne qu'elle contient des éléments susceptibles de boucher les distributeurs. Ces éléments sont de nature chimique (calcaire, fer), physique (sable, fragments de végétaux, argile, limon) ou biologique (micro-organismes). Une analyse de l'eau est nécessaire pour évaluer les risques de colmatage.

- Nature du sol : sur des sols à perméabilité moyenne ou faible, des goutteurs de 2 à 4 litres/h sont convenables (le bulbe humide s'étale). Dans les sols à forte perméabilité, l'eau a tendance à percoler en profondeur (le bulbe humide s'étiole). Il est préférable dans ce cas de choisir des diffuseurs qui humectent une surface de quelques m^2. Dans le cas de sol grossier et profond, ou d'argile gonflante présentant des fentes de retrait, il est préférable d'utiliser des mini-diffuseurs.

- Type de culture : les goutteurs de 4 l/h sont les plus utilisés en arboriculture.

- Topographie : lorsque la topographie de la parcelle est peu marquée ou qu'il est possible d'implanter des rampes de longueur limitée (100 à 200m), il est préférable d'utiliser des goutteurs non auto-régulants. Au contraire, dans le cas des plantations à topographie marquée et irrégulière ou de grande dimension, il est recommandé d'utiliser des goutteurs auto-régulants.

3-6- Critères et considération de conception

Le principal objectif est d'humecter le plus grand volume de sol par arbre tout en évitant la percolation en profondeur. Le volume minimal à humecter est de 35%. Il correspond à une superficie de sol allant de 10 m^2 à 12 m^2, avec un espacement de 5mx6m ou 6mx6m. La profondeur moyenne des racines sous irrigation goutte à goutte est de 60 cm. Selon la nature du sol, l'eau se répand comme il est indiqué dans le **Tableau 6.**

Tableau 6. Rayon moyen (cm) de diffusion latérale de l'eau des goutteurs en fonction de la texture du sol.

Type de sol	Rayon moyen d'épandage de l'eau
Texture légère	30
Texture moyenne	65
Texture fine	120

CEMAGFREF (1995).

À partir de ces indications il est possible d'adopter :

• **Une ligne simple de diffuseurs par rangée d'arbres**, avec des goutteurs placés tous les mètres le long de la ligne.

• **Un tracé circulaire ou en boucle autour de l'arbre.** Cette disposition compte 5 à 8 goutteurs autour de l'arbre, avec un diamètre du cercle variant de 1,2 m à 2,2 m. Les arbres jeunes seront munis de deux goutteurs seulement de chaque côté, placés à une vingtaine de cm du tronc.

• **Une double ligne de diffuseurs par rangée d'arbres,** soit une de chaque côté. Il est préférable de fixer les rampes à 1,2 m - 1,6 m du tronc de l'arbre adulte et à 0,4 m à 0,6 m lorsque l'olivier est plus jeune **(Photos 4 et 5).**

3-7-Normes de choix et d'utilisation

Ces normes concernent le système de sécurité qui permet de contrôler la pression et le débit de l'eau (monomètre, compteur d'eau, clapet anti-retour de l'eau et régulateur de pression). Les systèmes à huile sont dotés d'une grande précision. Les matériaux utilisés doivent supporter les pressions exercées mais également les risques d'oxydation engendrés par les produits. Une certaine facilité d'utilisation du matériel d'irrigation est requise.

Il est toutefois utile de :
- vérifier les normes de fonctionnement du système d'irrigation (spécifications techniques adaptées à la culture) lors de l'achat du matériel ainsi que les normes de sécurité,
- s'assurer de l'homogénéité de la distribution de l'eau qui doit être supérieure à 90% (effectuer un test d'uniformité en mesurant le débit d'un échantillon de distributeurs de l'eau).

Il est aussi utile d'entreprendre :

- une étude technique de faisabilité (sources d'eau, disponibilité et quantités en période de pointe, calcul des paramètres du réseau…),
- des contrôles réguliers des compteurs pour estimer les volumes distribués. Si une différence de 15-20% est constatée il faut chercher son origine (fuites, colmatages…).
- des contrôles réguliers des pressions qui doivent être stables pendant les irrigations et identiques d'une irrigation à l'autre. Si ce n'est pas le cas il faut se conformer au relevé du compteur d'eau pour calculer la pluviométrie réelle du réseau.

3-8-Entretien du réseau

L'entretien du système doit être effectué régulièrement afin d'éviter le colmatage des tuyaux, dû à la présence d'impuretés qui sont véhiculées par l'eau d'irrigation.

Le colmatage par le calcaire est traité à l'acide fort (en injectant dans le réseau d'irrigation une solution d'acide nitrique titrant de 2 à 5 litres de produit/m^3 d'eau). Le rinçage des rampes est obligatoire en fin d'opération.

Le fer précipité est difficile à éliminer. Il est important de s'assurer que l'eau ne contienne pas plus de 1,5 ppm de fer dissout et ce par une analyse préalable **(CEMAGFREF, 1995).**

Pour contrôler les micro-organismes, il est possible d'injecter de l'eau de javel à faible concentration (1 à 5 ppm) de manière périodique, par exemple à la fin de chaque irrigation.

A la fin de la saison d'irrigation, il est nécessaire d'ouvrir à l'air libre les rampes d'irrigation du côté aval (fin) pour faire évacuer les impuretés qui s'y sont accumulées durant la campagne.

Il est également nécessaire de nettoyer les filtres, voire même les remplacer, ainsi que les distributeurs d'eau (goutteurs) lorsque leur débit s'écarte de la norme sous l'effet de l'usure.

Il est également utile d'enrouler les rampes en dehors de la saison d'irrigation afin de les préserver **(Photo 4).**



Photo 4. Enroulement des rampes d'irrigation en hiver
et pendant les périodes de récolte et de taille.

Au démarrage de la campagne suivante, il faudra ré-étendre les rampes et les refermer à leur extrémité avale. Il est également nécessaire de contrôler la pression, le débit à l'amont et à l'aval des distributeurs de l'eau.

3-9-Efficacité

Lorsque le système goutte à goutte est correctement entretenu **(Photos 5 et 6),** son efficience d'utilisation de l'eau peut atteindre 90%, ***c.à.d,*** **pour 100 litres d'eau débités, 90 litres sont profitables à l'arbre.**



Photo 5. Fixation des rampes d'irrigation à 50 cm du tronc chez des oliviers âgés de 7-8 ans
et à 25 cm pour des arbres de 3-4 ans.

Pour s'assurer de l'efficacité du réseau d'irrigation il est utile de monter quelques compteurs d'eau en amont des rampes d'irrigation **(Photo 6)** afin de vérifier les quantités réellement fournies aux arbres.

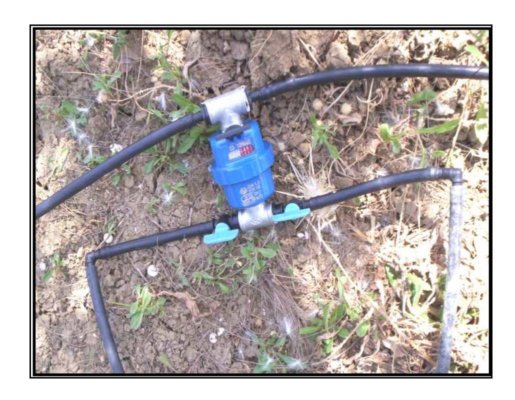


Photo 6. Compteur d'eau monté en amont des rampes d'irrigation pour la vérification des quantités d'eau fournies.

3-10-Avantages et limites

- L'eau est distribuée sur de grandes surfaces qui sont irriguées simultanément en utilisant des conduites fermées sous pression et en suivant le tracé le plus favorable (souvent le plus court).
- Ce système est économe de part son principe de fonctionnement. Il permet d'économiser 30-40% de l'eau d'irrigation par rapport au système gravitaire.
-Les doses sont contrôlées,
-L'utilisation de ce système est possible lorsque l'eau est chargée en sels avec un maximum de 3 g/l de RS. Les sels dissouts s'accumulent à la périphérie de la masse de sol humide et les plantes peuvent facilement puiser l'eau dont elles ont besoin.
-Utilisation sur des sols marginaux et d'accès difficile.
-La pratique de l'irrigation fertilisante : les engrais minéraux, correctement dosés, sont dissouts dans l'eau distribuée en rapport avec les stades de développement de la culture.
- Faibles besoins en main-d'œuvre, mais il est nécessaire d'avoir une certaine qualification de cette main d'œuvre et un entretien continu du système.

3-11- Coût

Le coût d'une installation complète d'irrigation goutte-à-goutte varie selon la densité de plantation puisque le nombre de goutteurs y dépend. Pour une plantation de 278 pieds/ha, le coût est évalué à 6000 DT. Le coût de l'ouvrage de tête représente 30% du coût total.

3-12-Conclusion

« L'irrigation localisée est la méthode la plus économe pour l'irrigation de l'olivette. Elle est la plus efficiente pour un résultat précis ».

4- Irrigation par micro-aspersion

4-1-Principe

L'irrigation en micro-aspersion repose sur la reconstitution du bulbe humide une fois que celui-ci est épuisé.

4-2-Convenance

Ce système convient aux terrains à fortes pentes et accidentés, mais ne convient pas lorsque l'eau est salée et dans les zones ventées.

4-3-Distribution de l'eau

L'eau est distribuée par des micro-asperseurs dont la portée dépend du débit et de la pression de la source d'eau. Elle est répartie sur toute la superficie sous forme de gouttes de pluie. La pression utilisée peut atteindre 5 bars. La forme du bulbe humide créée sous les micro-asperseur dépend de la texture du sol (Fig.6).

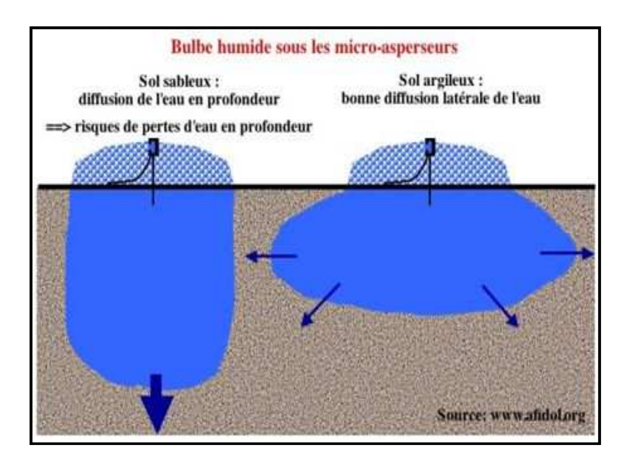


Fig.6. Distribution de l'eau en fonction de la nature du sol en irrigation par micro-aspersion (www.afidol.org).



Photo 7. Irrigation par micro-asperseur.

4-4-Dose

Les apports d'eau se font à **dose fixe** alors que la fréquence des irrigations est variable. **La fréquence des arrosages varie entre une à deux fois par semaine** selon la demande en eau mais également en fonction du type de sol et du micro-asperseur.

4-5-Matériel

Le matériel de la station de pompage et de distribution est comparable à celui du système d'irrigation localisée. Au niveau de la parcelle, l'irrigation se fait au moyen de rampes fixes ou mobiles, munies d'asperseurs rotatifs ou oscillants, de tuyaux percés de trous ou sprinklers.

4-6-Efficacité

Comparé au système gravitaire, l'irrigation par micro-aspersion est plus économe et permet une distribution plus homogène de l'eau. **La micro-aspersion a une efficience de 85 %, voire 80 % en cas de vent, *c.à.d.* sur 100 litres d'eau apportés, 80-85 litres sont réellement profitables à l'olivier.**

4-7-Avantages et limites

- L'humectation des parties aériennes de l'arbre sous climat chaud crée un microclimat favorable au développement de pathogènes sur les feuilles, les branches et le tronc.
- Les micro-asperseurs sont très sensibles à la pression de l'eau. Pour avoir un débit régulier et la même quantité d'eau distribuée sur toutes les parties de l'oliveraie, particulièrement celles qui sont en coteaux, il faut disposer d'une pompe et multiplier le nombre de micro-asperseurs et de régulateurs de pression, ce qui augmente le coût de l'installation.
- Une certaine qualification de la main d'œuvre est requise pour le fonctionnement du système et son entretien.
- Ce système ne permet pas l'application de l'irrigation fertilisante au sol, mais il permet la pulvérisation des engrais foliaires ou pesticides.
- Ce système permet d'atteindre la quasi-totalité de la zone des racines. Les colmatages sont moins fréquents par rapport au système goutte à goutte. L'installation est déplaçable pour permettre le travail du sol.

5- Dispositifs d'automatisation

C'est un système d'irrigation équipé de dispositif automatique de commande de l'irrigation :

-Les électrovannes: ce sont des vannes automatiques qui sont commandées à distance pour démarrer ou arrêter l'écoulement de l'eau.
-Les dispositifs de commande : ce sont des dispositifs automatiques de programmation de la durée de fonctionnement qui commandent les valves automatiques (électriques) à distance. Il existe plusieurs types qui permettent une programmation sur plusieurs jours.
-Les vannes volumétriques automatiques à compteur. Elles comprennent un compteur volumétrique, une commande de pilotage et un mécanisme de fermeture. Lorsque le volume prédéterminé a été distribué, la vanne se ferme automatiquement.

6-Conclusion générale

Le choix du système d'irrigation repose sur un certain nombre de paramètres dont il faut en tenir compte un à un. Mais quelque soit ce choix et **avant de décider du système d'irrigation, il faut:**

- Réaliser une étude préalable des ressources en eau (source d'eau permanente ou pas).
- Vérifier la qualité de l'eau au moyen d'analyses qui se font en période de consommation de pointe.
- Penser à construire un bassin de collecte de l'eau qui sera placé en hauteur par rapport à la parcelle à irriguer d'une dizaine de mètres et qui sera nettoyé régulièrement **(Application 3).**

- Tout projet d'irrigation pour une plantation d'olivier doit être accompagné par une étude du système de drainage sauf dans le cas de sols filtrants, ne présentant pas de substratum proche du sol. Ce réseau de drainage permet l'évacuation des eaux apportées en excès, le lessivage des sels et surtout d'éviter les problèmes d'hydromorphie associés à un risque de salinité ; dans quel cas des solutions sont à apporter notamment **une plantation sur ados** **(Photo 8).**



Photo 8. Plantation sur ados dans le cas d'une hydromorphie du sol associée à la salinité **(Larbi, 2011).**

D'autre part, il est à noter que :

- Dans les systèmes d'irrigation sous pression, les pertes d'eau sont quasiment nulles. Au cours de l'irrigation, les pertes varient de 10% en micro-irrigation à 30% en aspersion conventionnelle ainsi qu'en irrigation de surface.

-La main-d'œuvre requise pour le fonctionnement et l'entretien des réseaux en conduites sous pression varie entre 1/10 et 1/4 de celle nécessaire pour les canaux à ciel ouvert.

- Le coût des installations fixes pour l'irrigation localisée est plus élevé que celui des systèmes à aspersion. Il représente environ 50% du coût total d'installation de la parcelle.

Application 3

Taille du réservoir d'eau d'irrigation (Bassin de collecte de l'eau)

La capacité du réservoir d'eau (bassin) doit permettre d'emmagasiner une réserve qui assure l'irrigation de la parcelle pour une période d'un mois afin d'éviter les pénuries pendant les périodes critiques de développement de l'arbre et des fruits.

Données:

Au cours de la période de pointe, la consommation en eau d'une oliveraie en production s'élève à environ 80 litres/jour/arbre.

Question:

Quelle taille adopter pour le bassin ?

Réponse:

Pour une plantation de 278 pieds/ha consommant 80 litres d'eau /jour/arbre pendant le mois de juillet (période de pointe) et cultivée à 6mx6m, la consommation totale en eau sera de :

$$80 \text{ litres / jour} \times 278 \text{ pieds / ha} = 700 \text{ m}^3$$

La taille du réservoir sera de cet ordre de grandeur.



Photo 9. Nettoyage du bassin d'irrigation tous les 2-3 ans.

Chapitre 6

BESOINS EN EAU DE L'OLIVIER

METHODE CLIMATIQUE

1- Introduction

La transpiration est régie par la demande climatique (FAO, 1987). Pour fonctionner convenablement, l'arbre doit absorber autant d'eau qu'il en perd. La sortie de l'eau se fait au niveau des feuilles à travers leurs stomates. C'est grâce à ce processus que se fait la montée de la sève brute et l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs par les racines. Par l'irrigation, on intervient pour compenser ces pertes d'eau lorsque les réserves naturelles du sol ne sont plus suffisantes pour alimenter correctement la culture. Dans le cas de l'olivier, qui est considéré comme l'arbre fruitier xérophyte par excellence, les travaux menés sur l'irrigation ont montré qu'il peut valoriser hautement l'apport de l'eau. Cependant, pour obtenir une bonne efficience d'utilisation de cette eau, il est nécessaire de connaitre ses besoins réels en rapport avec son développement (Allen *et al.*, 1998 ; Villalobos *et al.*, 2000 ; Masmoudi *et al.*, 2004 a).

2- Notions fondamentales

« *Les besoins en eau d'une culture durant une période donnée sont représentés par la hauteur d'eau (mm) nécessaire à cette culture pour compenser les pertes d'eau enregistrées pendant cette même période sous l'effet de la demande climatique* » (Allen *et al.*, 1998).

Déterminer les besoins en eau de la culture de l'olivier, revient à estimer son évapotranspiration, notée ET_c, qui est définie pour un stade de développement donné et pour des conditions optimales de culture (bonne alimentation hydrique et minérale, pas de maladies, pas de mauvaises herbes) en vue d'une production maximale (Allen *et al.*, 1998).

L'évapotranspiration de la culture (ET_c) est calculée en fonction de l'évapotranspiration de référence, notée ET_0 (mm), d'un coefficient cultural K_c qui dépend de l'espèce et de son stade de développement et en rapport avec le taux de couverture du sol par la végétation qui est exprimé par le coefficient K_r.

3- Expression de l'évapotranspiration de la culture et ses composantes

3-1- L'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence est définie comme étant « *l'ensemble des pertes en eau par évaporation et par transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau et en sels minéraux et indemne de maladies* ».

La valeur de l'ET_0 (mm/jour) peut être déterminée à partir de mesures lysimétriques **(Deidda *et al.*, 1990 ; Caspari *et al.*, 1993)** ou de mesures du bac d'évaporation classe A ou encore calculée à partir de la formule universelle de Penman-Monteith **(Allen *et al.*, 1998)**. Dans ce cas, des mesures journalières des données climatiques de la région de culture sont requises.

Les données climatiques sont collectées au niveau d'une station météorologique classique ou d'une station automatique **(Photos 10 et 11)**. Dans les deux cas, la pluviométrie (P), les températures maximale (T_{max}) et minimale (T_{min}), les humidités maximale (HR_{max}) et minimale (HR_{min}) de l'air, la vitesse du vent (U_2) et le rayonnement global (R_g) y sont enregistrés à une échelle de temps horaire ou journalière.



Photo 10. Station météorologique classique.



Photo 11. Station météorologique automatique

Une fois les données climatiques saisies, il est possible de calculer directement $ET_{0,}$ au moyen d'une feuille Excel **(Application 4)** établie par la FAO.

Application 4

Estimation de l'évapotranspiration de référence ET_0 (mm) d'une région donnée en fonction de ses paramètres climatiques par la Méthode universelle de la FAO (Allen et al., 1998).

L'ET_0 se calcule en fonction de la latitude et de l'altitude de la région considérée et des paramètres climatiques journaliers.

ETo : feuille Excel de la FAO. كميات المياه المتبخرة يوميًا برمجية الفاو

Calcul de Eto

latitude	36,83
altitude	10

Année	mois	jour	Tmin	Tmax	Tm	RHmin	RHmax	RHm	U2	SS	Rg	EToJ
									m/s	h	cal/cm2/j	mm/j
2003	1	1	5	10	8	40	46	43	2,50	4	300	1,9
2003	1	2	7	11	9	41	49	45	2,00	5	280	1,7
2003	1	3	6	9	8	45	51	48	3,00	4,5	260	2,0
2003	1	4			0			0				
2003	1	5			0			0				
2003	1	6			0			0				
2003	1	7			0			0				
2003	1	8			0			0				
2003	1	9			0			0				
2003	1	10			0			0				

NB : Les données colorées sont celles de la région de Mornag.

A mesure que les données sont saisies, la valeur de l'ET_0 est calculée.

Certaines stations météorologiques utilisent un bac d'évaporation classe A pour estimer ET_0. Ce bac est standardisé. Il constitué d'une plaque d'acier galvanisée de forme circulaire, revêtue de peinture aluminium ou de métal de 0,8 mm d'épaisseur. Son diamètre est de 121 cm et sa profondeur de 25,5 cm (standard). Il est placé à 15 cm au-dessus du niveau du sol sur un support en bois et rempli d'eau jusqu'à 5 cm du bord. Un dispositif simple ou automatique permet de mesurer la baisse du niveau d'eau consécutive à son évaporation. Les mesures sont effectuées chaque matin à la même heure. On rétablit le niveau d'eau quand il s'abaisse à 7,5 cm en dessous du bord du bac. L'évapotranspiration de référence (ET_0, mm) est déterminée en calculant le produit de la mesure du bac par le coefficient du bac (0,8) **(CEMAGREF, 1990).**

3-2- Le coefficient cultural K_c

Le coefficient K_c est utilisé pour tenir compte des caractéristiques de la culture. Il varie en fonction de l'âge de la culture, de la saison et du stade phénologique **(Le Bourdelles, 1982, Pastor *et al.*, 1998 ; Testi *et al.*, 2004)**. A défaut de mesures locales, il est possible d'utiliser les valeurs ci-dessous mentionnées.

Pour de jeunes oliviers, **Le Bourdelles (1977)** recommande l'utilisation des valeurs suivantes:

- 0,3 pendant les deux premières années de culture (1 an et 2 ans).
- 0,4 pour les trois années suivantes (3 à 5 ans).
- 0,5 après la 5^{ième} année.

Pour des oliviers adultes en production, **Pastor et Orgaz (1994)** et **Fernandez et Moreno (1999)** recommandent les valeurs indiquées dans le **Tableau 7.**

Tableau 7. Valeurs mensuelles de K_c pour des oliviers adultes plantés au Sud de l'Espagne à la densité de 286 pieds/ha et couvrant 34% du sol.

	J	F	M	A	M	J	J^{t}	A	S	O	N	D
K_c	0,50	0,50	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,55	0,60	0,65	0,50

Pastor et Orgaz (1994); Fernandez et Moreno (1999).

La variation des valeurs de K_c traduit la variation de l'activité de la plante et de l'état hydrique du sol en surface. Durant les mois du printemps et de l'automne, la croissance rapide de l'arbre au niveau des pousses et la fréquence élevée de l'humectation du sol par les pluies se traduisent par des valeurs élevées de K_c. En période estivale, les faibles valeurs de K_c sont le résultat du ralentissement de l'activité physiologique de la plante et de la réduction de la fréquence des évènements pluvieux.

3-3- Le paramètre minoratif K_r

Les valeurs de K_r à utiliser lorsque le pourcentage de couverture du sol par la végétation est inférieur à 60% sont données au **Tableau 8.**

Tableau 8. Valeurs du coefficient K_r pour différents taux de couverture du sol par la végétation.

Pourcentage de couverture du sol	K_r
Plus de 50%	1,00
40 - 50 %	0,90
35 - 40 %	0,80
30 - 35 %	0,75
Inférieure à 30 %	0,70

COI (1997).

Application 5

Calcul du taux de couverture du sol et choix de K_r

Données :

Le rayon maximal moyen de la frondaison mesuré sur 5 jeunes oliviers représentatifs de la parcelle est : R = 2m

Question:

Quel est le taux de couverture du sol pour ce verger ?

Réponse :

La surface projetée au sol, S, déterminée à partir de R est égale à : $S = \pi \times R^2$,
Soit : $S = 3{,}14 \times 2^2 = 12{,}6\ m^2$

Si les oliviers sont plantés selon un écartement de 6mx6m, la surface utile par olivier S_u est égale à S_u = 6mx6m = 36 m^2

Le taux de couverture du sol par la végétation, noté T_x (%), est égal à :
T_x = 12,6/36 x 100 = 35%

En référence au **Tableau 8**, la valeur appropriée de K_r est égale à 0,75.

3-4- L'évapotranspiration de la culture

L'oliveraie est caractérisée par un sol partiellement couvert. Dans ce cas, l'évapotranspiration de la culture (ET_c, mm) s'écrit :

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_r$$

Avec :
K_c: Coefficient cultural.
K_r : Coefficient minoratif pour tenir compte du taux de couverture du sol par la végétation.
ET_0 : Evapotranspiration de référence (mm).

Le **tableau 9** présente les valeurs calculées des besoins en eau de la culture de l'olivier (ET_c) par la méthode de la FAO en fonction de l'âge, du stade de développement et de la région de culture. Les valeurs de l'ET_0 sont issues de mesures lysimétriques **(Nasr, 2002).**

Tableau 9. Besoins en eau de la culture de l'olivier (ET_c, mm) selon l'âge et le stade de développement pour différentes régions de la Tunisie.

Age	Plus de 10 ans		5-10 ans		3-5 ans		1 an et 2 ans	
Région / Période	1	2	1	2	1	2	1	2
Région de la basse vallée de la Medjerda	489	38	311	24	217	17	163	13
Medjez et Bab, Amdoun, Joumine, Bousselem, Testour, Teboursouk, Béjà et Jendouba	539	51	342	32	239	23	180	17
Sousse, Ksar Hellal, Monastir, Mahdia, Moknine, Teboulba, Jemmel et El Jem	509	57	323	36	226	25	170	19
Sbeitela, Feriana, Sbiba, Tala et Kasserine	600	67	381	43	267	30	200	22
Gabes	468	63	297	40	208	28	156	21
Ouasis du sud	660	59	419	37	293	26	220	20
Sidi Bouzid et Meknassi	462	84	294	53	206	37	154	28
Cap Bon	426	50	271	32	189	22	142	17

Période 1: 10 Février – 20 Mars. Période 2: 20 Mai – 10 Octobre.

Sources: Masmoudi-Charfi C., *et al.*, 2006. Document Technique N°2. Institut de l'Olivier.
Masmoudi-Charfi C., 2006. Document Technique N°3. Institut de l'Olivier.

Remarques:

-Dans le but de réduire les quantités d'eau d'irrigation, des recherches ont été menées dans différentes régions de la Tunisie en utilisant le concept de **l'irrigation déficitaire.** Les résultats ont montré que les valeurs présentées dans le tableau précédent ainsi que dans les références précitées peuvent être réduites de moitié sans pour autant affecter la croissance ou la production **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2010).**

- La méthode de la FAO estime à la fois la transpiration de l'arbre et l'évaporation du sol, ce qui peut majorer la quantité d'eau d'irrigation.
- Les pluies profitables à l'olivier (pluies efficaces) et les réserves en eau du sol ne sont pas quantifiées.
- Les variations de l'ET_0 enregistrées d'une année à l'autre nécessitent l'acquisition de données météorologiques sur un grand nombre d'années pour un pilotage pointu.
- Les coefficients culturaux publiés dans la littérature ne sont pas toujours adaptés à l'oliveraie puisqu'ils varient d'un verger à l'autre en fonction de la surface occupée par la frondaison et de la densité du feuillage.

Chapitre 7

CALCUL DES PARAMETRES DE L'IRRIGATION

L'irrigation est pratiquée selon un programme prédéterminé dans lequel un certain nombre de paramètres sont estimés telle que la dose et la fréquence des irrigations, la durée du tour d'eau…etc. Ces paramètres sont calculés comme il est indiqué dans ce qui suit.

1- Poste d'irrigation

C'est la surface cultivée pouvant être arrosée simultanément. La taille du poste dépend du débit par hectare et du débit de la source d'eau.

Surface du poste (ha) = Débit de la source d'eau (m^3/h) / Débit par ha (m^3/ha)

Application 6

Taille du poste d'irrigation

Données:

On considère une plantation d'oliviers de 1 ha, plantée selon l'écartement de 6m x 6m. Les arbres sont équipés chacun de 4 goutteurs débitant 4 l/h. Le réseau d'irrigation est muni d'une pompe fournissant 3,6 m^3 d'eau /h (1 l/s).

Question:

Quelle est la taille du poste d'irrigation ?

Réponse:

- Débit par arbre = 4 goutteurs x 4 l/h = 16 l/h
- Nombre d'arbres par hectare (1 ha = 10000 m^2) = 10 000 m^2 / (6m x 6m) = 278 arbres
- Débit par hectare = 278 arbres x 16 l/h/arbre = 4448 l/h/ha = 4,4 m^3/h/ha
- Taille du poste = 3,6 (m^3/h) / 4,4 (m^3/h/ha) = 0 ha 82 ares.

2-Durée de l'irrigation

C'est la durée nécessaire pour irriguer un ensemble de parcelles avec la même source d'eau.

Durée de l'irrigation (heure) = Durée de l'irrigation par poste (h) x Nombre de postes raccordés à la même source d'eau

Application 7

Durée de l'irrigation

Données:

La dose journalière à apporter sur une plantation d'oliviers de 10 ha est de 1 mm.
Les arbres sont espacés de 6mx6m et équipés chacun de 4 goutteurs de 4 l/heure.
Le réseau d'irrigation est approvisionné par une borne fournissant 6 m^3/h.

- Débit par arbre = 4 goutteurs x 4 l/h = 16 l/h
- Surface occupée par un olivier, S_u = 6m x 6m = 36 m^2
- Nombre d'arbres par ha = 10 000 m^2 / (6 m x 6 m) = 278 pieds
- Débit par ha = 278 arbres x 16 l/h/arbre = 4448 l/h/ha = 4,4 m^3/h/ha

Question:

Quelle est la durée de l'irrigation ?

Réponse:

- Taille du poste = 6 m^3/h : 4,4 m^3/h/ha = 1 ha 36

- Nombre de postes sur le verger = 10 ha : 1,36 ha = 7,35 soit 7 postes

- Durée de l'irrigation par poste = 1 mm x (6m x 6m) : 16 l/h = 2,25 h ou 2 h et 18 mn

- Durée totale de l'irrigation = 2,25 h x 7 postes = 15 h 45 min.

3- Déclenchement de l'irrigation en début de campagne

La date de déclenchement de l'irrigation en début de campagne dépend de la quantité d'eau disponible dans le sol, définie par:

Eau disponible = Réserves du sol + Pluies utiles

L'apport de l'eau pourra se faire comme il est indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 10. Pilotage de l'irrigation en fonction du système d'irrigation.

Système d'irrigation	Moment d'apport de l'eau
Goutte à goutte	Epuisement de la moitié de RFU
Micro-aspersion et gravitaire	Epuisement de la totalité de RFU

Tron *et al.*, (2000)

La réserve du sol peut être déterminée au moyen de mesures gravimétriques.

4- Périodes d'apport de l'eau

L'olivier passe au cours de son cycle de développement par différents stades (Sanz-Cortès, 2002), qui se succèdent tout au long d'un cycle de végétation :

Mars - avril : Développement des feuilles, des pousses et floraison.
Mai - juin : Nouaison des fleurs, croissance des olives et durcissement de leurs noyaux.
Juillet : Croissance des fruits et des pousses végétatives (en irrigué).
Août : Croissance lente des fruits et des pousses végétatives. Début de synthèse de l'huile (lipogenèse).
Septembre : Croissance rapide des fruits et des rameaux. Véraison : les olives sont tournantes, couleur violacée. Récolte des variétés précoces (Lucques, Manzanille).
Octobre : La croissance des fruits et des rameaux se poursuit. Récolte de la variété Picholine.
Novembre : Ralentissement de la croissance végétative. Récolte des olives à huile.
Novembre - Janvier : Croissance végétative faible à nulle. La récolte des olives à huile se poursuit.
Janvier - Mars : L'olivier est en quiescence hivernale.

La figure 7 présente les stades de développement des fruits et l'évolution saisonnière de l'état hydrique du sol en absence d'irrigation, montrant une baisse importante des réserves en eau au cours de la période de croissance des fruits.

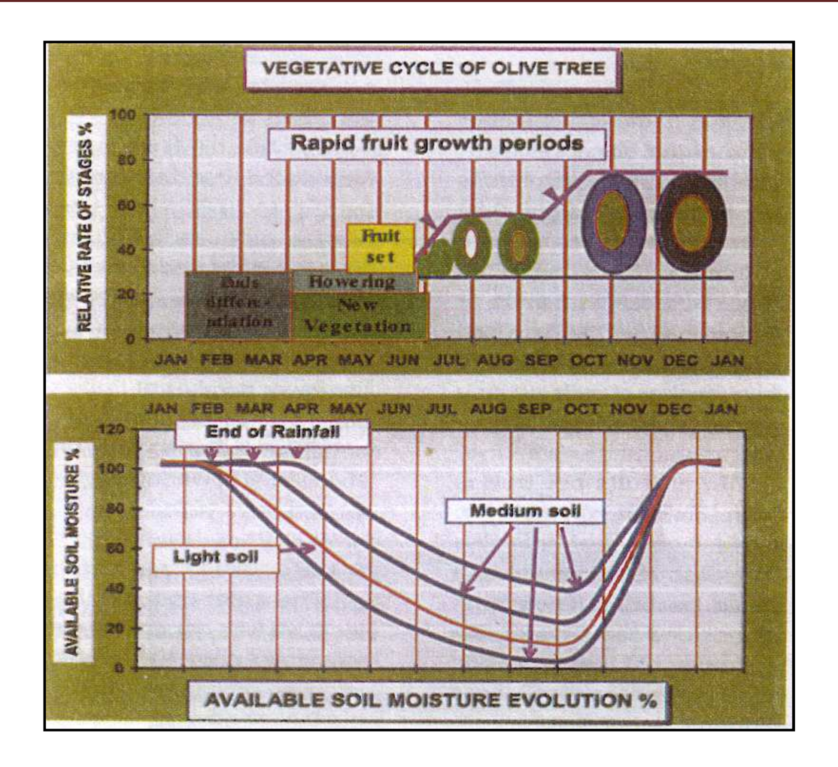


Fig.7. Stades de développement des olives et évolution de l'état hydrique du sol en absence d'irrigation **(Rallo, 1998).**

L'irrigation favorise la croissance estivale des pousses **(Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2007 et 2008)**, qui s'ajoutera à la croissance printanière et automnale. Ceci permettrait la différenciation d'un nombre plus élevé de sites de fructification.

L'olivier produit ses fruits sur les pousses formées l'année qui précède la floraison. Par conséquent il est nécessaire que **l'oliveraie soit irriguée aussi bien durant les années « moins » (année de faible charge en fruits) qu'en année « plus » (année de forte charge en olives).** Ainsi, l'oliveraie devra être irriguée de février à octobre pour couvrir successivement les processus de différenciation florale (février), la vague de croissance printanière (mars-fin avril), la nouaison des olives et le premier stade de leur développement (mai-juin), le stade de durcissement des noyaux des olives (fin juin), la vague de croissance estivale (juillet), les processus d'induction et d'initiation florale (août), la vague de croissance automnale et enfin le stade de grossissement ultime des olives et leur maturation (septembre-octobre).

NB: En été, il est conseillé d'irriguer la parcelle tôt le matin ou tard l'après midi pour éviter l'évaporation de l'eau au cours des heures de fort rayonnement. Durant la période de floraison, il est conseillé de réduire les apports d'eau.

5-Dose d'irrigation

La dose d'irrigation est la quantité d'eau à appliquer en vue de satisfaire les besoins en eau de la culture pour une période déterminée (jour, décade…). Elle est exprimée en millimètre d'eau, en m^3/ha ou en litre/arbre sachant que :

$$1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1 \text{ litre/m}^2$$

Pour convertir une dose en litre/arbre, la dose exprimée en millimètre est multipliée par la surface occupée par l'olivier en m^2. Cette surface est égale au produit des écartements.

La quantité d'eau à apporter par irrigation (I, mm) est définie par: $I\ (mm) = ET_c\ (mm) - P_e\ (mm)$

Avec P_e : la pluie efficace, *c.à.d.* la quantité de pluie utile et profitable à l'arbre.

Généralement, on prend P_e = 70% P avec P, la pluie relevée sur une période donnée, par exemple, mensuelle.

Pour plus de précision, P_e peut être déterminée de la manière suivante:

P_e = 0,8 P si P > 75 mm/mois,
P_e = 0,6 P si P < 75 mm/mois.

Les précipitations sont considérées comme inefficaces lorsqu'elles sont inférieures à 10 mm.

Application 8

Dose nette d'irrigation

L'irrigation doit être appliquée lorsque le pourcentage admissible (p) d'humidité disponible (S_a) est épuisé dans la profondeur d'enracinement, c.-à-d. quand elle doit réalimenter l'eau épuisée.

Par conséquent, la profondeur nette de la dose d'irrigation (d, mm) s'écrit:

$$d = (S_a \times p) \times D$$

Où:

S_a = humidité disponible (mm /m),
p = tarissement admissible (fraction),
D = profondeur d'enracinement (m).

Exemple:

Si S_a = 99 mm/m, p = 0,5, D = 0,4 m,

La dose d'irrigation nette qui compensera le déficit d'humidité sera de :

$$d = 99 \times 0{,}5 \times 0{,}4 = 19{,}8 \text{ mm.}$$

Application 9

Dose d'irrigation en goutte à goutte

Données:

Les besoins en eau de l'olivier adulte cultivé dans la région de Mornag durant la 3ème décade de juin s'élèvent à 18,6 mm (pour les 10 jours).

Question:

Quelle est la dose d'irrigation ?

Réponse:

Si on suppose que l'on a reçu 10 mm de pluie durant cette décade; les pluies utiles P_e sont de l'ordre de 7 mm (10 mm x 70% = 7 mm).

Par conséquent les besoins réels seront de (18,6 mm – 7 mm) = 11,6 mm soit 116 m^3 d'eau par hectare.

La dose journalière est de 11,6 mm/10 = 1,16 mm ou 11,6m^3/ha ou 41,7 l/arbre/jour si l'écartement entre les arbres est de 6mx6m (278 pieds/ha).

Sachant que l'efficience du système est de 90%, la dose sera de 1,16 mm : 0,9 = 1,29 mm/jour

Cette dose est à corriger en fonction des relevés tensiométriques.

Application 10

Périodicité des irrigations en micro-aspersion

Données:

Les besoins en eau de l'olivier adulte cultivé dans la région de Mornag durant la 3ième décade de juin s'élèvent à 18,6 mm (pour les 10 jours).

Question:

Si on suppose qu'aucune pluie n'a été enregistrée, quelle est la durée entre deux irrigations si la dose est fixée à 20 mm.

Réponse:

La consommation journalière prévisionnelle = 18,6 mm : 10 jours = 1,86 mm/jour

La durée entre deux irrigations = 20 mm x 85 % : 1,86 mm/jour = 9,1 jours.

Cette durée est à corriger en fonction des relevés tensiométriques.

Il s'agit du nombre de jours entre deux irrigations consécutives: $i = d/ET_c$,

Où :
d = la profondeur nette d'application de l'irrigation en mm (dose).
ET_c est l'évapotranspiration journalière de la culture en mm/jour.

Si d = 19,8 mm et ET_c = 2,5 mm/jour, i = 19,8 : 2,5 = 8 jours.

Source des données utilisées dans les applications pour le calcul des paramètres de l'irrigation: http://www.afidoltek.org/index.php/Les_besoins_en_eau_de_l'olivier.

6-Besoins en eau de lessivage

La quantité d'eau à apporter dépend des besoins de la culture et de la qualité de l'eau d'irrigation. Dans le cas des eaux saumâtres, il convient d'ajouter une fraction d'eau de lessivage des sels **(Application 11).** Un volume d'eau supplémentaire sera donc appliqué durant l'irrigation pour les besoins de lessivage, qui entrainera les sels en dehors de la zone des racines.

Les besoins de lessivage (BL, mm) sont intégrés dans le calcul de la dose nette d'irrigation. Ils sont exprimés en fonction de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation CE_i et de la valeur limite de la conductivité électrique pour l'olivier, qui est de l'ordre de 3 mmhos.

Application 11

Besoins en eau de lessivage (BL)

Données:

Conductivité électrique de l'eau d'irrigation, notée CEi = 3,8 mmhos / cm
Conductivité électrique limite pour l'olivier = 3 mmhos / cm

Question:

Quelle est la dose de lessivage ?

Réponse:

Les besoins en eaux de lessivage (BL, mm) sont exprimés par BL = CE_i / (5 CE_{limite} – CEi) x 1/E
Soit BL = (3,8 / 5x3 - 3,8) x 1/0,6 = 0,33 x 1,66 = 0,54 soit 54%

Il faut donc majorer les doses d'irrigation de 54%.

7- Efficience d'application de l'irrigation

Les efficiences relatives au matériel d'irrigation sont données dans le **tableau 11.**

Tableau 11. Efficience d'application de l'irrigation pour divers systèmes ou méthodes d'irrigation au niveau de l'exploitation.

Système/méthode	E_a %
Réseau de canal en terre, irrigation de surface	40-50
Réseau de canal revêtu, irrigation de surface	50-60
Réseau de conduites sous pression, irrigation de surface	65-75
Systèmes d'irrigation par tuyaux souples	70-80
Systèmes d'aspersion basse et moyenne pression	75
Micro-asperseurs, micro-jets, mini-asperseurs	75-85
Irrigation goutte-à-goutte	80-90

CEMAGREF (1990)

Application 12

Efficience d'application de l'irrigation

La quantité d'eau à stocker dans la zone des racines correspond à la dose nette d'irrigation (d). Toutefois, durant l'irrigation, des quantités importantes d'eau se perdent par évaporation, infiltration, percolation profonde, etc. La quantité perdue dépend de l'efficience du système.

L'efficience d'application de l'irrigation (E_a) s'exprime par: E_a = d / eau appliquée (brute) *100 où (d) est l'eau stockée dans la zone des racines.

Données:

La dose nette d'irrigation (d) pour une surface de 1 ha est de 19,8 mm, *c.-à-d.* 198 m^3.
Le volume d'eau distribué durant l'irrigation est de 280 m^3.

Question :

Quelle est l'efficience d'application ?
Quantité d'eau perdue ?

Réponse:

E_a = 198 / 280 = 0,70.

Les 30% restants de l'eau appliquée sont considérés comme perdus.

8-Résultats de quelques essais conduits en Tunisie: doses appliquées et productivités

Le tableau ci-dessous présente des valeurs de l'EUE obtenues en Tunisie sous différentes conditions culturales.

Tableau 12. Efficiences de l'utilisation de l'eau obtenues en Tunisie sous différentes conditions de culture.

Lieu	Quantité d'eau m^3/ha	Surface m^2/arbre	Q^té d'eau m^3/arbre	Production Kg/arbre	EUE Kg d'olives/m^3
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,94 (CEE)	13000	36	47	24,27	0,52
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,60 (CEE)	8300	36	30	24,4	0,85
Oliviers irrigués ETR/ETP =0,40 (CEE)	5700	36	20	23,5	1,17
P=250 mm I=370 mm	6200	61	38	29	0,77
Olivier pluvial (Tunis)	4500	144	65	30	0,50
Enfidha	3800	256	97	50	0,50
Sfax terre très légère	1700	576	100	42	0,42
Sfax terre légère	1900	576	112	44	0,39
Sfax sous sol lourd salé	1600	576	94	24	0,25
Sfax culture intensive	1900	345	66	23	0,35

Vernet et al., (1970).

La meilleure efficience d'utilisation de l'eau pour des oliviers Chétoui conduits en intensif dans le Nord de la Tunisie est de 1,17 kg d'olives par m^3 d'eau apporté.

FICHE TECHNIQUE D'UTILISATION

IRRIGATION GOUTTE A GOUTTE DE L'OLIVIER
(EXEMPLE DE CALCUL POUR LE MOIS DE POINTE)

Culture adulte (K_c = 0,7 et K_r = 0,75)	Olivier
Distance entre les lignes	8 m
Distance entre les pieds	6 m
Surface vitale d'un plant	48 m^2
Nature du sol	Limono-sableux
Besoin mensuel en eau ET_c pour juillet (ET_o Juillet = 180 mm)	90 mm
Distance entre conduites goutte à goutte	8 m
Distance entre goutteurs	1 m
Surface utile couverte par goutteur	8 m^2
Débit d'un goutteur	4 l/h
Pluviométrie horaire (mm)	0,50
Nombre d'heures pour une application de 90 mm/mois	180h
Nombre d'heures par mois	720 h
Rapport entre heures d'irrigation et heures de repos	1/3
Intervalle entre deux passages	2j
Durée d'irrigation par passage (12h x 15 passages / mois x 0,5 mm = 90 mm/mois)	12 h
Pluviométrie par passage	6mm
Nombre de goutteurs par ha	1250
Débit horaire par ha	5m^3/h/ha

SOMIVAC (1982).

Chapitre 8

CONSOMMATION EN EAU DE L'OLIVIER MESURES PHYSIOLOGIQUES

1-Consommation en eau de l'olivier

La consommation réelle en eau de la culture, notée ET_r (ou ET_a: Actual evapotranspiration), est la quantité d'eau réellement absorbée par la culture au cours d'une période donnée. Elle est généralement inférieure à l'ET_c et dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels, l'écartement entre les arbres et le taux de couverture du sol par la végétation **(Cruz Conde et Fuentes, 1989)** comme le montre le **Tableau 13** où la consommation en eau est rapportée à l'arbre, pris en tant qu'individu et exprimée en terme litres l'eau transpirés par pied et par jour.

Tableau 13. Transpiration (T) de l'olivier Picual en fonction de la densité de plantation. Valeurs observées sur de jeunes oliviers bien développés cultivés à Cordoue, Espagne.

Nombre d'oliviers/ha (Densité)	Pourcentage de couverture du sol	T_{max} (litre/pied/jour)	Dose à apporter (mm/jour)	T_{max} / ETP
100 (10m x 10m)	25	135	1,35	0,25
150 (8m x 8m)	36	103	1,53	0,29
200 (7m x 7m)	40	85	1,70	0,32
250 (6m x 7m)	43	73	1,82	0,34
300 (6m x 6m)	45	65	1,95	0,36
400 (5m x 5m)	50	54	2,16	0,40

NB: Valeur moyenne transpirée par olivier jeune durant la période juin-août: 0,35 litre/m^2 de feuille. Evaporation bac A de 6,6 mm et ETP-Thorntwhite de 5,4 mm. ETP (avril-octobre): 820 mm **(Cruz Conde et Fuentes, 1989)**.

Ce tableau montre que lorsque le nombre de pieds/ha augmente de 100 à 400 pieds/ha, le pourcentage de couverture du sol augmente de 25% à 50%. Par contre, la valeur journalière de la transpiration maximale (T_{max}) diminue de 135 à 54 litres/pied alors que le rapport T_{max}/ ETP augment de 0,25 à 0,40. Ce rapport peut être considéré comme étant le coefficient cultural K_c en dehors des périodes où le sol est humecté en surface.

Les valeurs de l'ET_r ne représentent pas les quantités d'eau à apporter par l'irrigation. Des coefficients de majoration liés à l'efficience du système d'irrigation doivent être appliqués en fonction du système d'irrigation, tel que :

- pour le goutte-à-goutte: 1 / 0,9 (efficience du système de 90 %).
- pour la micro-aspersion: 1 / 0,85 (efficience du système de 85 %).

2-Mécanisme de fonctionnement

« La transpiration est un processus évaporatoire par lequel l'eau s'échappe de la plante à travers les stomates des feuilles vers l'atmosphère sous l'effet de la demande climatique ». Au lever du soleil, la lumière provoque l'ouverture des stomates des feuilles. La plante commence à transpirer en régulant son rythme en fonction de l'importance de la demande climatique et atteint son maximum environ une heure après le passage du soleil au zénith (midi solaire). Lorsque l'eau est disponible au niveau du sol, les quantités transpirées quotidiennement par la plante sont voisines de celles qui sont absorbées par les racines **(Cruiziat et Tyree, 1990 ; Clothier et Green, 1994)**. Par conséquent, le flux d'eau traversant la plante peut être considéré comme conservatif (absorption = transpiration) et dans ce cas, la mesure du flux de la sève brute peut fournir une estimation précise de la consommation en eau du végétal mais dans un système de culture discontinu (arbre pris en tant qu'individu) et à une échelle de temps réduite. Il est possible alors de séparer les flux évaporatoires de la plante (transpiration) et du sol (évaporation), qu'il soit couvert ou non par une végétation secondaire.

3- Mesure du flux de la sève xylémique

3-1-Techniques de mesures du flux de la sève brute

Le concept de mesure du flux de la sève a été développé par **Huber (1932)-cité par Swanson (1994)-**. Il est basé sur le fait que le passage de la sève dans les tissus conducteurs de la tige perturbe sensiblement la diffusion de la chaleur dans ces tissus. Ces variations peuvent être mesurées et exprimées en termes de flux. Depuis ce premier modèle, plusieurs techniques ont été développées et utilisées **(Nasr, 1987 ; Cabibel, 1991 ; Cabibel et Do, 1991 a et b ; Cohen, 1991 ; Cabibel et Isbérie, 1997 ; Do *et al.*, 1998 ; Fernandez *et al.*, 2001 ; Granier, 1985 et 1987 ; Green, 1988 et 1993 ; Granier *et al.*, 1996 ; Masmoudi *et al.*, 2004 b; Moreno *et al.*, 1996 ; Do et Rocheteau, 2003)**. Ces techniques, bien qu'elles diffèrent selon le paramètre mesuré (temps ou écart de temps), la complexité de l'équipement, le coût de l'installation et le domaine d'application **(Smith et Allen, 1996)**, utilisent toutes la chaleur comme traceur thermique et qui est diffusée soit par impulsion soit par dissipation de l'onde de chaleur. Il existe trois principaux groupes: (1) les méthodes basées sur la vitesse de transfert d'une impulsion de chaleur, (2) celles qui analysent le bilan d'énergie en présence d'une source de chaleur continue ou (3) les méthodes basées sur l'observation de la variation de la température au voisinage d'une source de chaleur connue. Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes dépend de l'objectif du travail et du type de matériel végétal utilisé **(Swanson, 1994)**.

3-1-1-Méthodes par impulsion de la chaleur

Le système est constitué par une sonde unique, chauffante, placée à la surface du rameau et en amont d'un thermocouple. La méthode consiste à déterminer le temps au bout duquel une brève impulsion de chaleur émise par un élément chauffant atteint un point situé à une distance connue en aval de la sonde chauffante **(Swanson 1994)**. Ce temps de transport est égal à celui qui est mis par la sève pour atteindre le point de mesure en supposant que la chaleur est transportée totalement par convection. Cette méthode a été utilisée sur Vitis vinifera **(Yunusa *et al.*, 2000-cités par Abid-Karray, 2006)**, Pinus radiata **(Teskey et Sheriff, 1996-cités par Abid-Karray, 2006)** et Olea europaea **(Moreno et al., 1996 ; Fernandez et Moreno, 1999 ; Palomo *et al.*, 1998)**. Elle exprime le flux de la sève en fonction de la vitesse d'impulsion de la chaleur et de la diffusivité thermique du bois.

L'avantage de la technique est son faible coût énergétique et d'investissement. Elle permet de mesurer des débits supérieurs à 60 cm/h mais elle ne convient pas aux faibles débits en raison de sa sensibilité aux gradients thermiques **(Swanson, 1994).** Son inconvénient majeur est la ponctualité des mesures qui diminue la précision de la technique et augmente la variabilité entre les observations. Il est donc nécessaire de multiplier les points de mesures en considérant différentes profondeurs dans le xylème et plusieurs directions.

3-1-2-Méthode de bilan de chaleur

Développée par **Daum (1967)-cité par Nasr (1987)-,** cette méthode ne fut utilisée sur la totalité de la section du tronc qu'en 1979 par **Sakuratani (Sakuratani, 1979-cité par Nasr 1987-).** Par la suite, les travaux se sont multipliés sur différentes espèces **(Massai *et al.*, 2000 ; Nasr, 1987),** notamment sur jeunes oliviers **(Dichio *et al.*, 1998-cités par Fernandez et Moreno, 1999-).**

La méthode consiste à appliquer une quantité de chaleur de manière continue au niveau d'une section du tronc, à estimer les flux de chaleur conductifs sur la portion chauffée et à déduire les flux convectifs liés au déplacement de la sève et qui sont proportionnels au débit d'eau **(Nasr, 1987).** Elle est applicable sur des sections de faible diamètre (moins de 15 cm).

3-1-3-Méthodes de dissipation de la chaleur

Cette méthode a été développée par **Granier (1985, 1987 a et b).** Elle consiste à mesurer au niveau des vaisseaux conducteurs de la sève brute, l'écart de température qui est crée entre une sonde de référence et une sonde chauffante suite à la dissipation, par convection, d'une onde de chaleur. La différence de température obtenue est maximale pour un débit de sève nul et diminue lorsque la vitesse du flux de la sève augmente suite à la dissipation d'une quantité de plus en plus élevée de la chaleur, produite par la sonde chauffante.

Les résultats obtenus sur différentes espèces forestières et fruitières sont cohérents aux mesures de potentiel hydrique foliaire sur pin **(Loustau *et al.*, 1990)** et aux mesures gravimétriques effectuées sur Manguier (Mangifera indica). De bonnes corrélations ont été également obtenues entre les mesures du flux de la sève et l'évapotranspiration de référence notamment chez le bananier et l'olivier **(Moreno *et al.*, 1996 ; Fernandez *et al.*, 2001 ; Lu *et al.*, 2004).**

La méthode s'adapte à une large gamme d'espèces et de matériel végétal. Elle permet d'effectuer des mesures sur une longue période allant jusqu'à deux saisons de culture **(Lu *et al.*, 2004).** L'installation de l'équipement est simple, requiert une faible puissance de fonctionnement avec un coût relativement réduit. Cependant, le caractère individuel de la mesure pose un problème au moment de l'extrapolation des résultats à l'ensemble de la parcelle. Il peut en résulte des erreurs d'estimation des flux **(Kostner *et al.*, 1998).** Le passage de l'individu au couvert végétal utilise des paramètres caractéristiques de la végétation telle que la densité de plantation, l'indice foliaire ou la surface du rameau conductrice de l'eau, qu'il faut déterminer spécifiquement pour chaque cas **(Granier *et al.*, 2000 ; Rana et Katerji, 2000).**

3-2- Procédure de calcul

La procédure de **Do et Rocheteau (2002 a et b)** est utilisée pour traduire les 'signaux' émis par les capteurs en densité de flux horaire F_d (litre de sève qui transite en une heure à travers une section de rameau de 1 dm^2, $l/h/dm^2$), définie par :

$$F_d = (11{,}3\ K\ / 1\text{-}K)^{0{,}707}$$

K est l'indice du flux, paramètre sans dimension, déterminé à partir de ΔT_a et ΔT_{max} où ΔT_{max} est la valeur maximale de la différence de température. Elle est généralement observée avant l'aube et est mesurée à flux nul. K est défini par :

$$K = (\Delta T_{max} - \Delta T_a) / \Delta T_a$$

ΔT_a est exprimée par :

$$\Delta T_a = \Delta T_{on} - \Delta T_{off}$$

ΔT_{on} et ΔT_{off} représentent respectivement la différence de température enregistrée à la fin de la période de chauffage et celle qui est mesurée à la fin de la période de non chauffage.

L'indice de flux K a été déterminé expérimentalement par **Granier (1985)** pour différentes espèces forestières à partir de mesures simultanées de l'exsudat issu de portions de rameaux et le signal donné par le capteur thermique. Le flux total (F, l/h) traversant le tronc est le produit des valeurs journalières de F_d par la section transversale du bois d'aubier conductrice de l'eau ($S_{c,}$ dm^2) telle que :

$$F = F_d \times S_c$$

Le flux moyen de la parcelle (litre/jour) est déterminé en calculant la moyenne arithmétique des flux en considérant l'ensemble des capteurs et des arbres (n) tel que :

$$T_a = \Sigma F_i / n$$

La transpiration (T, mm) de l'oliveraie est exprimée en fonction de T_a et de la surface occupée par chaque olivier (S_u, m^2) :

$$T = T_a / S_u$$

3-3- Dispositif de mesures du flux de la sève brute

Les capteurs sont constitués de deux sondes. La sonde amont (placée en bas) donne la température de référence ($T_{réf}$) alors que la sonde aval (placée en haut du tronc) est équipée d'un élément chauffant qui fonctionne à puissance constante, moyennant un chauffage intermittent qui permet de tenir compte de l'effet du graduant naturel. La chaleur diffuse à travers le bois et la sève par le passage de la sève et induit une différence de température entre les deux sondes. Le système est alimenté par une batterie reliée à un panneau solaire qui assure sa recharge. Les signaux émis par les capteurs sont enregistrés au niveau d'une centrale d'acquisition des données. Ce dispositif est illustré par la **figure 8 (Lu *et al.,* 2004).**

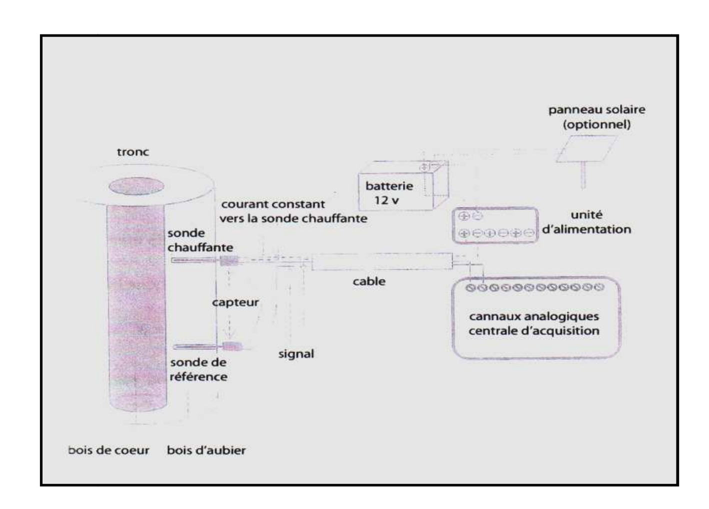


Fig.8. Schéma du dispositif de mesure du flux de la sève brute.
(Lu *et al.*, 2004).

L'application n°13 est un exemple dans lequel la méthode de dissipation de l'onde de chaleur a été utilisée pour estimer la consommation en eau de jeunes oliviers Chétoui (**Mahjoub, 2004 ; Masmoudi *et al.*, 2004 b ; Masmoudi-Charfi, 2008 ; Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011**).

Application 13

Travaux de recherches menés en Tunisie

Détermination de la consommation en eau de jeunes oliviers Chétoui par la mesure du flux de la sève brute

a- Site et Objectif

L'étude a été réalisée à Mornag sur de jeunes oliviers de la variété Chétoui plantés à la densité de 278 pieds/ha et conduits sous irrigation de complément dans le but d'estimer leur consommation en eau. La méthode de dissipation de l'onde de chaleur **(Granier, 1985, 1987a, 1987b)** a été utilisée. Les relations entre les mesures de flux, la demande climatique et l'état hydrique du sol ont été étudiées. Un ordre de grandeur de la transpiration de l'arbre est avancé. Les étapes du travail sont les suivantes:

b- Installation des capteurs au champ

Des capteurs thermiques type Granier ont été insérés radialement sous l'écorce du tronc de trois oliviers Chétoui à 40 cm au dessus du niveau du sol, selon différentes orientations **(Photo 12)**. L'électronique nécessaire pour l'alimentation des capteurs et l'enregistrement des données a été développée localement **(Masmoudi *et al.,* 2004 b)**. Les capteurs ont été chauffés par intermittence de 30 mn de chauffage / 30 mn de non – chauffage et fonctionnant avec une puissance constante (10 ohms/0,2Watt). Une batterie de 12V (20 mA) a été utilisée à cet égard.

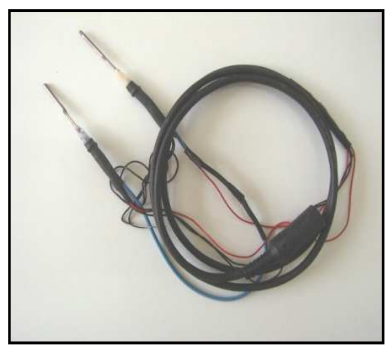




Photo 12. A gauche : Capteur de flux de sève constitué de deux sondes (sonde chauffante et sonde de référence). Au milieu : Capteur installé sous l'écorce du tronc d'olivier Chétoui âgé de six ans. Les deux sondes du capteur sont décalées l'une par rapport à l'autre pour éviter les interférences. La sonde aval (haut) est chauffante. A droite : Capteurs enveloppés par un film en aluminium isotherme pour éviter leur réchauffement par le rayonnement réfléchi.

c- Mesures et procédure de calcul

Les signaux émis par le capteur ont été enregistrés sous forme physique (mV) au niveau d'une centrale d'acquisition de données DL2 (data logger Delta-T Devices, co.uk), puis traduits en densité de flux horaire F_d selon la procédure de **Do et Rocheteau (2002 a et b)**. Les valeurs de flux F sont obtenues après étalonnage des capteurs et détermination de la section transversale du bois d'aubier conductrice de l'eau ($S_{c,}$ dm^2).

d- Etalonnage des capteurs de flux utilisés dans l'expérimentation

L'étalonnage des capteurs consiste à établir une relation entre la densité de flux et l'indice de flux K. L'expérimentation a été réalisée sur une portion fraiche d'un rameau d'olivier Chétoui de 5 cm de diamètre et de 40 cm de long au niveau duquel ont été insérés plusieurs capteurs thermiques, fonctionnant sous différentes pressions de l'eau et puissances de chauffage ($\mathcal{P}$). **(Photo 13).** Le principe consiste à faire passer de l'eau javellisée sous pression (0-4 bars) au niveau de la portion de ce rameau et de déterminer d'une part le poids de l'eau qui s'y écoule et d'autre part la mesure du signal correspondant, converti en densité de flux.

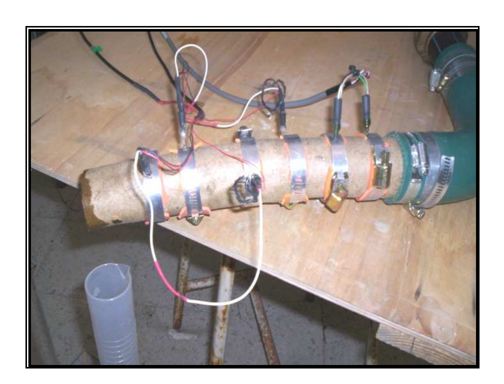


Photo 13. Dispositif d'étalonnage des capteurs de mesure du flux de la sève
(Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).

Les résultats ont montré que la densité de flux dépend de la puissance de chauffage des capteurs **(Fig.9)**. Lorsque la puissance de chauffage augmente, les valeurs de F_d diminuent pour une même valeur de K. Cette relation est ci-dessous explicitée pour différentes valeurs de $\mathcal{P}$.

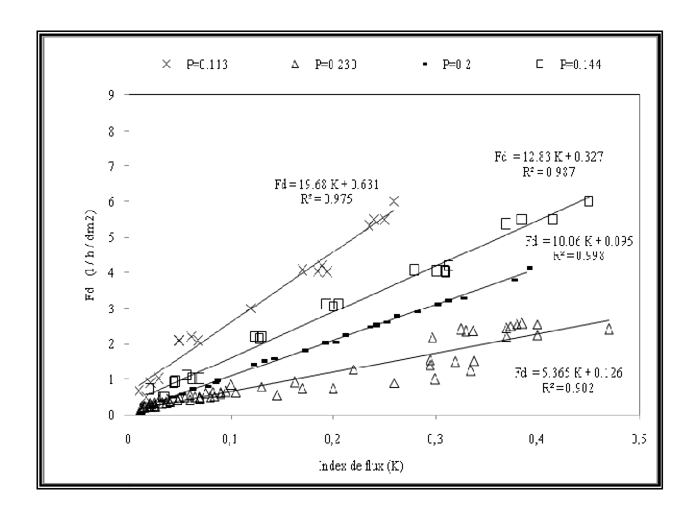


Fig.9. Relation entre la densité de flux (F_d, $l/h/dm^2$) et l'indice de flux K pour différentes puissances de chauffage **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

Le paramètre (a) tel que définit dans l'équation de **Do et Rocheteau (2002 a et b)** s'exprime en fonction de la puissance de chauffage par :

$$a = 180{,}74e^{-15.23\,\mathcal{P}} \qquad \text{avec} \quad r=0{,}969$$

Lorsque $\mathcal{P}$ augmente de 0,113 à 0,230 W, les valeurs de (a) diminuent de 35 à 5.

e- Section du rameau conductrice de l'eau.

La section conductrice de l'eau S_c a été déterminée par coloration spécifique en utilisant la *Safranine Orange* et des portions de rameaux de diamètre allant de 1 à 12 cm. Le principe consiste à simuler l'appel de transpiration au moyen d'une pompe à vide durant une période donnée, ce qui permet la montée de l'eau colorée dans la portion de rameau et sa coloration **(Photo 14).**



Photo 14. Dispositif expérimental conçu pour la détermination de la section du bois conducteur de l'eau **(Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).**

Après coloration, des observations anatomiques ont été réalisées sur des rondelles de bois finement et fraîchement coupées à main levée. La section totale de la portion du rameau ainsi que celles des différentes zones colorées au niveau de chaque section ont été déterminées au moyen du *logiciel Arcview.* Au niveau des coupes, une hétérogénéité de la coloration est observée **(Photo 15)**. Elle est due à la présence de différentes structures. Sur des coupes bien colorées, la moelle apparaît en blanc alors que le bois conducteur est coloré en rouge sang. L'écorce conserve sa couleur verte-brune.

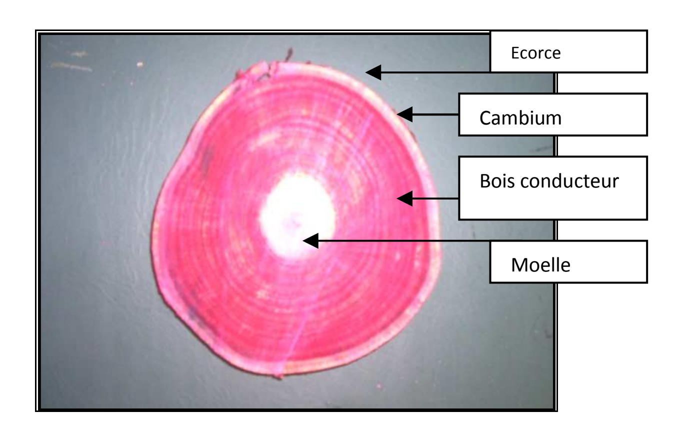


Photo 15. Coupe transversale d'un rameau d'olivier de 5 cm de diamètre après coloration à la Safranine Orange. De l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce colorée en vert brun, le bois conducteur en rouge avec alternance de cernes claires et foncées et la moelle, au centre, claire. Le cambium est représenté par un anneau interrompu, couleur rouge foncé, placé entre l'écorce et le bois conducteur **(Abid-Karray, 2006 et Masmoudi-Charfi, 2008).**

La section totale du rameau (cm^2) d'olivier est étroitement corrélée avec la section du bois conducteur de la sève (S_c, cm^2) pour des rameaux de diamètres allant de 1 à 12 cm **(Fig.10).**

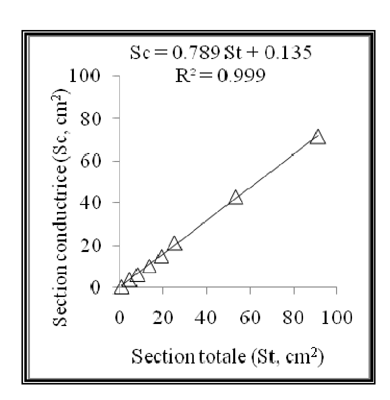


Fig.10. Relation entre la section totale du rameau (cm^2) d'olivier et la section du bois conducteur de la sève (cm^2).

Cette corrélation est exprimée par : $S_c = 0{,}798\ S_t + 0{,}2383$ avec $r = 0{,}99$

f- Evolution de la densité de flux et ses facteurs de variations

- Signaux émis par les capteurs

Au cours d'un cycle de chauffage, les signaux évoluent différemment pendant les heures diurnes et nocturnes. Ils sont plus faibles le jour que ce soit pour les valeurs maximales ou minimales. La nuit, les signaux n'atteignent pas de palier ni en phase de chauffage ni au cours du refroidissement, mais une valeur maximale variant de 0,20 à 0,27 mV ou minimale proche de zéro. Pendant la journée, les signaux atteignent rapidement les valeurs d'équilibre V_{on} et V_{off} avec un maximum de 0,15 mV et un minimum pratiquement nul ou négatif **(Fig.11)**. La transition entre le régime nocturne et diurne est rapide. Le palier est établi au bout du 3ème cycle que ce soit à l'aube ou à l'aurore.

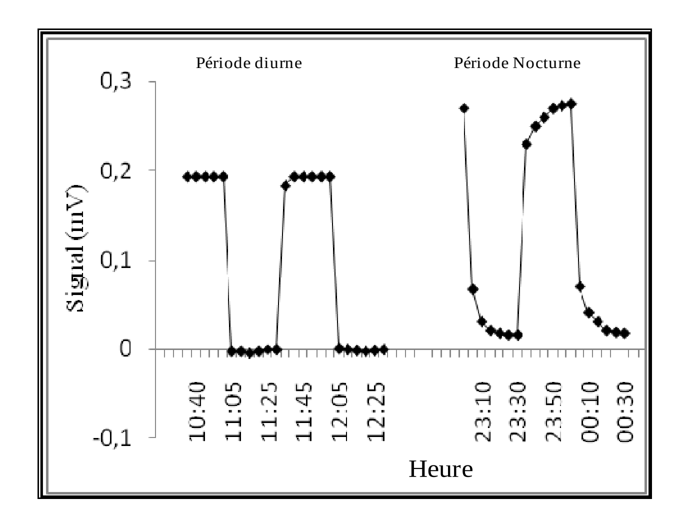


Fig.11. Variation des signaux émis par les capteurs (mV) au cours d'un cycle de chauffage **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

Cette dynamique résulte de la variation de l'écart de température entre les sondes du capteur. En absence de flux transpiratoire la nuit, la différence de température est maximale entre la sonde chauffée et la sonde de référence. Pendant les heures diurnes, le passage du flux de sève sous l'effet de la demande climatique tend à homogénéiser le milieu sève - bois, réduisant ainsi l'écart de température entre les deux sondes ; c'est ce qui explique la baisse des signaux au cours de la journée et l'établissement des paliers. Le cycle de 30 mn de chauffage et de 30 mn de non chauffage parait convenable malgré le nombre d'observations limité.

- Densité de flux

La **figure 12** est un exemple type de l'évolution journalière de la densité de flux de la sève. Elle montre une évolution synchrone des valeurs de F_d avec R_g.

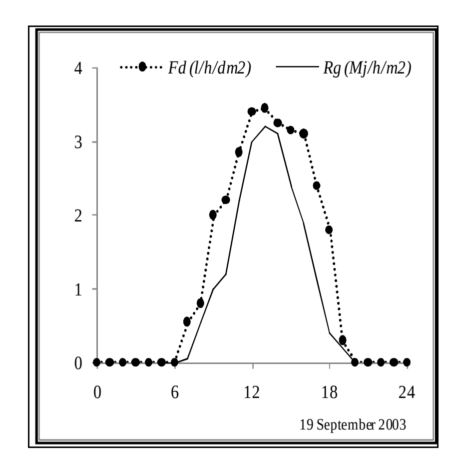


Fig.12. Evolution de la densité de flux de sève (l/h/dm^2) et du rayonnement global (Mj/h/m^2) au cours d'une journée d'automne **(Masmoudi-Charfi *et al.,* 2011).**

A la levée du jour, F_d augmente rapidement pour piquer aux alentours du midi solaire. Le rayonnement global commence à décliner à partir de 13 h alors que les valeurs de F_d commencent à diminuer à partir de 15 h. Au-delà de 18 h, F_d diminue rapidement et s'annule vers 21h.

g-Variation de F_d en fonction de l'état hydrique du sol et de la demande climatique

Les valeurs de F_d varient en fonction de la demande climatique et l'état hydrique du sol comme le montre les **figures 13 et 14**. En automne et sous de bonnes conditions d'alimentation hydrique (humidité du sol supérieure à 30%) et une demande évaporatoire modérée (exemple de la journée du 19/9, ET_0 = 3,7 mm/jour, $T_{max.}$= 28°C et $T_{min.}$= 19°C), les variations de F_d suivent de près celles de R_g atteignant un maximum de 3,45 l/h/dm^2 pour R_g de l'ordre de 3,2 Mj/h/m^2 **(fig.14).** En période de pluie, F_d diminue considérablement suite à la baisse significative du rayonnement. L'exemple illustratif de la **figure 13** (17 Octobre 2003) montre que pour ET_0 de 1,4 mm, T_{max} = 25° et T_{min} = 19°C et R_g = 1,0 Mj/h/m^2, F_d maximal est de 1,9 l/h/dm^2. Au cours des mois d'été (juin-août), F_d augmente avec l'augmentation de R_g mais son augmentation reste tributaire des conditions hydriques. En absence d'irrigation (exemple du 22/6 avec ET_0 = 6,8 mm/jour, T_{max} = 35°C et T_{min} = 20°C), F_d augmente juste après le levé du soleil et atteint dès les premières heures matinales des valeurs limites qui sont maintenues pendant 10-12 h alors que R_g continue d'augmenter. Sous irrigation, les valeurs de F_d n'augmentent pas systématiquement avec l'apport de l'eau. Des augmentations ponctuelles sont toutefois observées une heure après l'irrigation, par exemple au cours de la journée du 10/8 (ET_0 = 5,7 mm, T_{max} = 35°C et T_{min} = 24°C) avec une valeur maximale de 3,3 l/h/dm^2. La présence du plateau est expliquée par la fermeture partielle des stomates, qui se produit lorsque le système radiculaire ne parvient plus à subvenir aux besoins en eau de la plante. Cette relation est explicitée par la **figure 15** qui montre que F_d est étroitement liée à la demande climatique avec des coefficients de corrélations qui varient de 0,941 à 0,980 en fonction de l'état hydrique du sol.

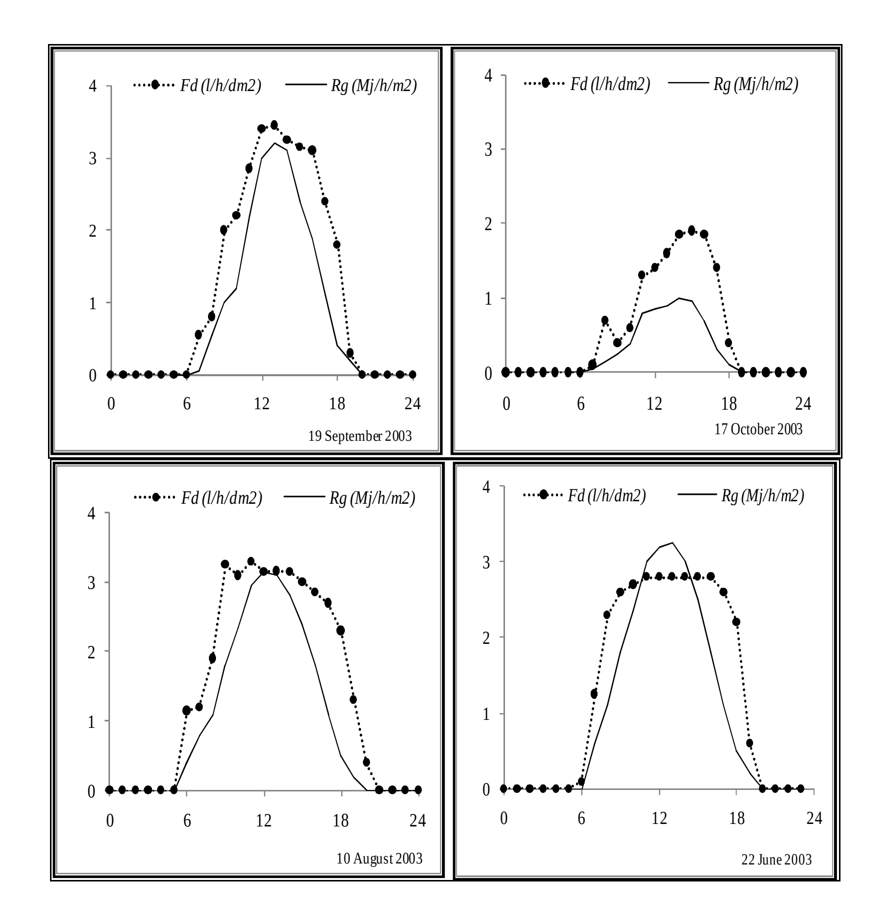


Fig.13. Evolution de la densité de flux de sève (l/h/dm^2) en fonction de l'état hydrique du sol et de la demande climatique au cours de la campagne 2003. Les journées choisies sont caractérisées par (1) des conditions climatiques modérées (19/9), (2) une demande climatique élevée (10/8), (3) un manque d'eau accompagné du vent de sirocco (22/6) et (4) une demande climatique faible avec pluie (17/10). **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

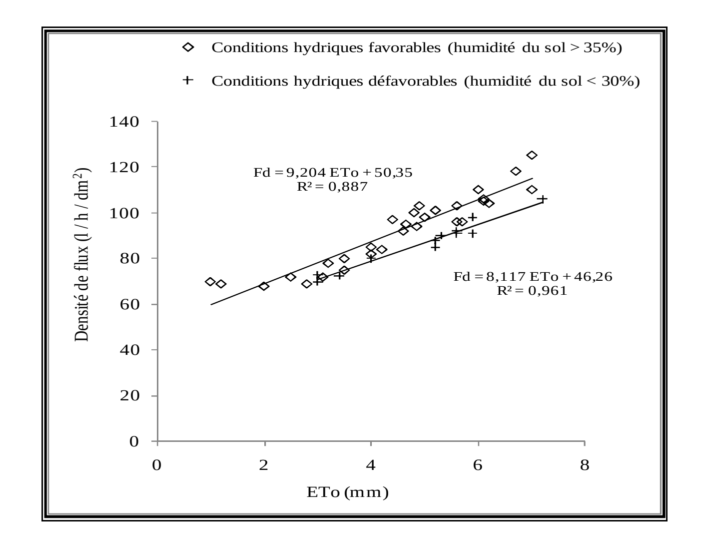


Fig.14. Densité de flux moyenne (l/h/dm^2) mesurée pendant une journée ensoleillée (26/7/003) sous différents états hydriques du sol **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

Les résultats montrent que le flux de sève mesuré au niveau du tronc est synchrone à la demande climatique, mais son augmentation atteint une valeur seuil au-delà de laquelle l'intensité de flux est d'autant moins proportionnelle à l'évapotranspiration que celle-ci augmente. Matériellement ceci se traduit par une stabilisation des valeurs de flux au milieu de la journée alors que R_g continue à augmenter, montrant que des mécanismes de régulation internes sont mis en jeu en vue de limiter la consommation hydrique de l'arbre.

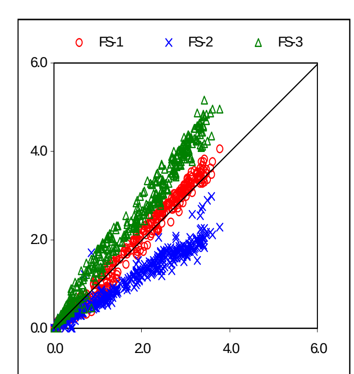
Ces résultats concordent avec ceux de **Abid-Karray (2006)** qui a observé que la densité de flux de la sève en condition de bonne alimentation hydrique suit celle de R_g avec un maximum variant de 1,9 à 3,0 $l/h/dm^2$ pour des rayonnements globaux maximums variant de 94 à 223 $J/h/dm^2$ et des valeurs de déficit de saturation de l'air allant de 1,48 à 0,44 KPa. La baisse de la densité de flux vers 14 h coïncide avec le maximum de déficit de saturation de l'air. En présence de sirocco, l'évolution du flux de la sève présente la même allure avec des valeurs de flux nettement plus élevées en dépit de valeurs de rayonnement global comparables. Cette augmentation est liée à l'effet advectif du sirocco. Au cours d'une journée pluvieuse, le rayonnement global présente des fluctuations liées au passage des nuages. Les valeurs de flux peuvent présenter une course différée par rapport au rayonnement global qui serait attribuée au temps nécessaire pour l'évaporation de la pluie interceptée par le feuillage. Pour une demande climatique faible ou nulle, le flux de sève décroît et peut s'annuler. Les flux nocturnes sont présents lors d'une séquence de forte évapotranspiration journalière. Néanmoins, ils peuvent trouver leur origine dans la reconstitution des réserves en eau de la canopée et du tronc qui ont contribué à la satisfaction de la demande évaporatoire diurne.

D'un autre côté, des observations réalisées par **Abid-Karray (2006)** sur des oliviers de la variété Chemlali cultivés à Kairouan et soumis à une irrigation complémentaire estivale, ont montré que l'apport de l'eau génère dans la plupart des cas une augmentation du rapport des densités de flux mesurées au niveau deux capteurs. Les valeurs obtenues au niveau des capteurs orientés N et SO sont de 1,42 avant l'apport de l'eau et 2,22 après l'irrigation. Pour l'orientation SE ce rapport reste constant. Cette variabilité trouve son origine dans l'hétérogénéité du système de conduction de l'eau. Les capteurs insérés au niveau des vaisseaux conducteurs peuvent être reliés au même vaisseau radiculaire ou à un vaisseau différent qui se trouverait soit dans la zone humectée par l'eau d'irrigation soit en dehors de celle-ci. De ce fait la réponse de ces capteurs à l'apport hydrique peut être différente. Par contre si ces deux capteurs sont reliés au même vaisseau radiculaire, la variation du rapport des densités de flux sera plus faible.

Quant aux relations reliant la demande climatique à l'utilisation de l'eau, les résultats explicités par la **figure 15** concordent avec ceux de **Giorgio et D'Andria (2002)** qui ont trouvé une étroite corrélation entre ET_0 et la transpiration chez l'olivier Kalamata cultivé en pluvial et en irrigué avec une consommation en verger allant de 9 à 22 l/arbre/jour pour ET_0 de 5 mm/jour. De leur côté, **Granier *et al.*, (1996)**, **Moneno *et al.*, (1996)** et **Cabibel et Isbérie (1997)** ont observé une bonne corrélation entre les mesures directes de la transpiration et les valeurs déterminées par l'équation de Penman-Monteith (PM). Un écart entre les valeurs est observé dès les premières heures matinales (9-10 h) chez les arbres non irrigués et qui augmente au cours de la journée. Le maximum de flux est mesuré vers 15 h pour la racine et 16 h au niveau du tronc. Les résultats ont également montré que l'évapotranspiration de référence présente une meilleure relation avec le flux de sève quotidien car elle intègre l'influence de facteurs climatiques, autres que le rayonnement global.

h-Variation de la densité de flux en fonction de l'emplacement du capteur

L'évolution de la densité de flux produite par un capteur, tracée en fonction du flux moyen de l'arbre est présentée dans la **figure 15**.



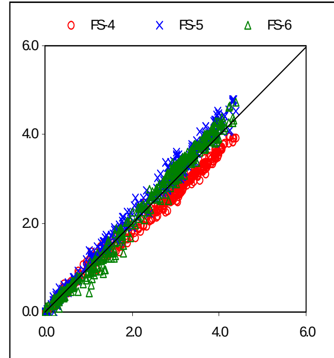


Fig.15. Relation entre la densité de flux horaire (l/dm^2/h) enregistrée par un capteur et la moyenne des mesures. Les groupes de capteurs (FS1, FS4), (FS2, FS5) et (FS3, FS6) sont orientés respectivement N, SE et SO. Les mesures correspondent à une trentaine de jours répartis sur toute l'année caractérisés par un bon état hydrique du sol **(Masmoudi-Charfi, 2008).**

La comparaison des tracés montre que pour une même orientation (par exemple FS1, FS4 orientés tous les deux Nord), les valeurs de flux peuvent se confondre avec la 1[ière] bissectrice ou s'écarter de celle-ci **(Fig.16).** Les valeurs maximales de l'arbre 1 ont été observées au niveau du capteur FS3 orienté SO alors qu'au niveau de l'arbre 2 les densités de flux sont très proches. Ces résultats montrent que certains capteurs surestiment la densité de flux alors que d'autres la sous-estiment. Ils concordent avec ceux obtenus par **Abid-Karray (2006)** sur olivier Chemlali, qui a donné un flux maximal compris entre 20 et 80 l/dm^2/jour selon le capteur.

Ces différences mettent en évidence l'hétérogénéité du flux dans la section du bois mais qui ne serait pas nécessairement due à l'orientation. En effet, la comparaison des différentes orientations a montré que le poids relatif d'une direction donnée diffère selon les arbres et que la répartition directionnelle de la densité du flux est plutôt aléatoire. Elle serait due à la variabilité de la conductivité de la sève dans la section du tronc qui semble être liée à la nature de la connexion des vaisseaux du xylème avec la partie aérienne. Cette hypothèse a été vérifiée sur les coupes anatomiques colorées à la safranine, montrant une variabilité de l'intensité de la coloration, témoin de l'hétérogénéité du tissu conducteur de la sève brute. Ces résultats corroborent ceux de **Nicolas *et al.*, (2005)** qui attribuent la similarité des valeurs de flux obtenues pour les orientations Nord et Sud à une uniformité de distribution des vaisseaux conducteurs. Dans le même sens, **Granier (1987 a et b)** observe sur le Douglas des variations azimutales du flux au cours des journées à forte demande climatique et une homogénéité des mesures du flux entre les orientations NO, NE et S pour les journées où cette demande a été faible. Ces variations confirment l'existence d'une hétérogénéité des transferts de l'eau dans le bois. La sectorisation des échanges hydriques permet d'expliquer en partie cette hétérogénéité. Dans les cas les plus marqués un secteur déterminé communiquerait d'une part avec une portion de la couronne de l'arbre et d'autre part avec une racine ou un faisceau radiculaire **(Connor et Fereres, 2005).**

i- Evolution de la densité de flux journalier au cours de l'année et détermination de la grandeur transpiration

La **figure 16** présente l'évolution de la densité de flux moyenne mesurée de mai 2003 à mars 2004 au niveau des trois arbres Chétoui. Le maximum est observé au niveau de l'arbre 2 alors que le minimum est noté au niveau de l'arbre 1. L'amplitude des écarts entre les densités de flux des trois arbres est plus élevée en été.

Les densités de flux journaliers varient entre 5 l/dm²/jour (février) et 45 l/dm²/jour (août), donnant un flux journalier F_d allant de 5 l à 41 l pour une section totale moyenne du tronc de 1,13 dm^2 (diamètre moyen du tronc au cours de l'année de l'essai de 12 cm) et une section conductrice de l'eau de 0,906 dm^2.

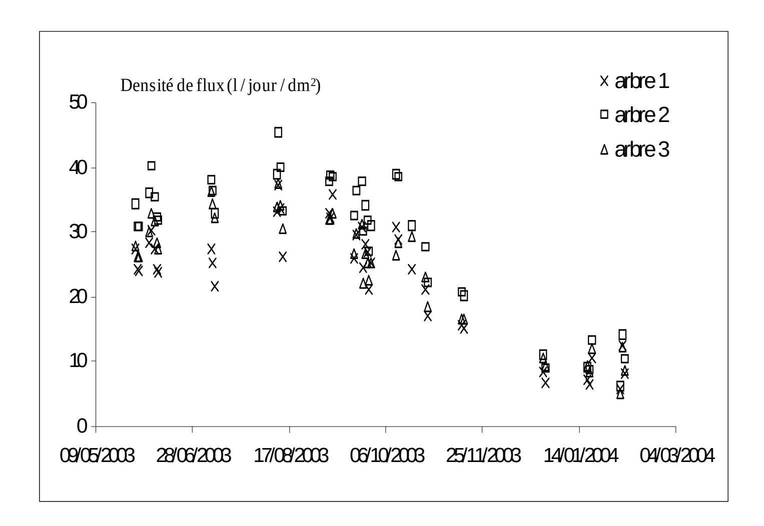


Fig.16 Evolution de la densité moyenne de flux de sève (l/dm^2/jour) chez de jeunes oliviers Chétoui au cours de la période Mai 2003–Mars 2004. Les données correspondent à une trentaine de jours caractérisés par un bon état hydrique du sol et des états de température et de rayonnement variables **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2011).**

La consommation journalière varie de 5 à 41 litres, donnant une transpiration allant de 0,14 mm à 1,14 mm pour des valeurs respectives d'ET_0 variant entre 1,5 mm (février) et 5,7 mm (Août). Le rapport T/ET_0 (représentant le coefficient cultural de base K_{cb}, donc la transpiration), a varié de 0,09 à 0,20. Ceci veut dire que **la transpiration maximale mesurée au mois d'août est de l'ordre de 20%ET_0** (35 mm). Le rapport T/ET_c est égal à 0,53. Ces valeurs sont comparables à celles qui ont été rapportées par **Moreno *et al.*, (1996)** et **Fernandez et Moreno (1999),** selon lesquels l'olivier adulte Manzanille conduit sous irrigation consomme 35 à 39 litres d'eau/jour pour une surface foliaire de 21 m^2 soit 1,65 mm/jour. Le flux maximum enregistré chez l'olivier non irrigué est de 0,78 mm/jour, il n'atteint jamais le niveau de transpiration des arbres irrigués même après irrigation.

Conclusion Générale

La méthode climatique ne permet pas de dissocier les composantes (T) et (E). C'est pourquoi il est utile de faire recours à des mesures ponctuelles, en l'occurrence, la mesure du flux de la sève brute a permis de déterminer la quantité d'eau réellement consommée par l'arbre, pris en tant qu'individu et qui est nettement plus faible que la valeur estimée par la méthode de la FAO. Pour des oliviers jeunes, elle ne représente en période de pointe que 20% ET_0.

Chapitre 9

CONSOMMATION EN EAU DE L'OLIVIER BILAN HYDRIQUE

La méthode du bilan hydrique permet de déterminer l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal in situ **(Palomo *et al.*, 2002 ; Abid-Karray, 2006).** Sous irrigation localisée et en absence de pertes d'eau par drainage, par percolation profonde ou par ruissellement (dose correspondant au besoin) et de remontée capillaire, **le bilan hydrique** s'écrit :

$$(P_e + I) - \Delta S = ET_r$$

Où :
P_e : pluie efficace,
I : quantité d'eau d'irrigation,
ET_r : Evapotranspiration réelle de la culture,
$\Delta S = S_f - S_i$, variation du stock d'eau avec S_f et S_i les teneurs en eau du sol observées à la fin et au début de la période d'étude.

Les teneurs en eau du sol au début (S_i) et à la fin (S_f) de la période considérée sont déterminées à partir de mesures de l'humidité volumique du sol (H_v, %), telle que :

$$S\ (mm) = 10 \times H_v\ (\%) \times D\ (m)$$

H_v est déterminée au moyen de la gravimétrie, de la sonde à neutrons ou par la méthode TDR (Time Domain Reflectrometry) et D, étant la profondeur d'enracinement (m).

Chapitre 10

PILOTAGE DE L'IRRIGATION MESURES DIRECTES ET INDIRECTES

Le pilotage de l'irrigation peut se faire à travers un suivi de l'état hydrique ou énergétique du sol ou de la plante ou des deux à la fois moyennant un suivi tensiométrique, des mesures régulières de l'humidité du sol ou encore des mesures micro-morphométriques qui permettent de guider l'oléiculteur pour mener à bien l'irrigation.

1- Mesures au sol

1-1-Tensiomètre

1-1-1- Intérêt et principe

Le tensiomètre permet de contrôler de manière simple et fréquente l'état hydrique du sol. C'est un moyen pratique et peu coûteux qui nous renseigne sur la disponibilité de l'eau pour la culture. **Le tensiomètre ne mesure pas la teneur en eau du sol** mais les forces de rétention de l'eau (tensions ou succions en centibars ou cb) par les particules du sol à une profondeur donnée ; plus le sol est sec (peu d'eau), plus l'eau est retenue par les particules du sol et plus le niveau de succion serait élevé (forte tension). Ainsi, les tensions (valeur de dépression lue sur le manomètre du tensiomètre) augmentent lorsque le sol se dessèche et elles diminuent lorsque le sol est humide. En général, une zone de très forte teneur en eau est observée près du distributeur d'eau. L'humidité diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne latéralement du point d'eau.

1-1-2- Appareillage

Le tensiomètre à eau est constitué d'un tube en plastique fermé, une bougie en céramique poreuse à sa partie inférieure et un manomètre au sommet. Il est disponible en plusieurs longueurs, de 30 à 150 cm **(CTIFL, 1999 ; Tron *et al.,* 2000)**.

1-1-3-Installation et précautions

La mise en place des tensiomètres est délicate et nécessite une préparation préalable de l'appareil qui consiste à 'dégazer' les tubes (en les remplissant d'une eau portée à ébullition), puis de s'assurer de la saturation des pores de la bougie. Un contrôle du manomètre est souhaitable. Les tensiomètres sont ensuite placés **de manière permanente** dans des trous carottés dans le sol à l'aide d'une tarière à spirale à une distance et à une profondeur qui dépendent de l'intérêt de leur usage et du type de sol **(Fig.18 et Photo 16)**, mais pas directement sous un arroseur ni en dehors de la zone irriguée. Les tensiomètres devraient être placés **en périphérie du bulbe humide,** ce qui permet de réajuster périodiquement les doses d'irrigation.



Photo 16. Installation des tensiomètres au niveau du bulbe humide.
(www.afidol.org).

Le contact entre le tensiomètre et le sol environnant est assuré par l'écoulement d'une boue épaisse qui chassera progressivement l'air se trouvant dans le trou. Il est conseillé de placer un tensiomètre à 30 cm de profondeur et un autre à 60 cm, ce qui permet d'analyser la dynamique des réserves du sol. Un troisième tensiomètre peut être positionné à 90 cm pour définir la dose d'irrigation et contrôler le drainage de l'eau (Tron *et al.,* 2000).

-*Tensiomètre placé à 30 cm de profondeur* permet de déterminer le moment opportun de déclencher l'irrigation en début de saison. Si la tension de cette sonde ne chute pas dans les 24 h après la première irrigation, c'est que la dose a été trop faible.
- *Tensiomètre placé à 60 cm de profondeur* donne une indication de l'état hydrique du sol entre 2 irrigations. Celui-ci doit être maintenu à des valeurs comprises entre le sol ressuyé et le confort hydrique.
- *Tensiomètre placé à 90 cm de profondeur* nous permet de détecter l'engorgement du sol. Une tension nulle pendant plusieurs jours signifie qu'il y a engorgement du sol. La dose a été trop forte. Dans ce cas il faut différer les irrigations suivantes pour permettre l'assainissement des couches profondes.

Le tableau 14 donne des indications sur l'emplacement des tensiomètres.

Tableau 14. Distance entre le tensiomètre et le distributeur de l'eau

Profondeur du tensiomètre	En goutte-à-goutte	En micro-aspersion
30cm	30 cm du goutteur	A 2/3 de la distance entre le diffuseur et la fin du jet
60cm	A mi-distance entre le goutteur et la sonde placée à 30cm	A mi-distance entre le diffuseur et la sonde placée à 30 cm
90cm	A hauteur de la sonde à 60cm	A hauteur de la sonde à 60 cm.

Tron *et al.,* (2000).

Le mauvais positionnement des tensiomètres donne de fausses indications quant au moment de déclencher les irrigations (Fig.17).

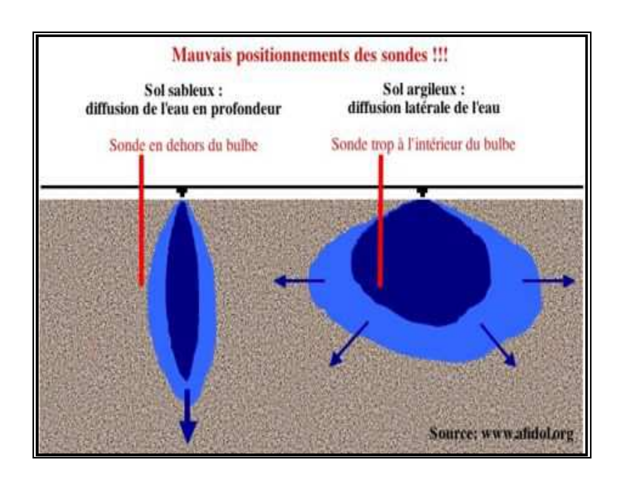


Fig.17. Cas de mauvais positionnement des tensiomètres (www.afidol.org)

Dans les terres filtrantes, le tensiomètre 30cm devrait être placé à moins de 30 cm étant donné que l'eau diffuse peu latéralement. Par contre, en sol argileux, le tensiomètre sera placé à plus de 30 cm du goutteur. Il est important de multiplier les points de mesures surtout lorsque le terrain n'est pas homogène sur toute la surface (par exemple, 3 séries de 2 sondes à des profondeurs de 30cm et 60 cm).

1-1-4- Relevés tensiométriques et pilotage de l'irrigation

Le tensiomètre nécessite une surveillance régulière et fréquente. La gamme de tension mesurée est limitée au maximum à la pression atmosphérique ambiante. Les relevés doivent être effectués au moins 2 fois par semaine et enregistrés sur une fiche appropriée. La lecture de la mesure est directe et est indiquée en cb sachant que :

1 centibar (1 cb) = 1 kilo Pascal (1 kPa)

Les valeurs indiquées dans le **tableau 15** donnent une idée sur l'état hydrique du sol et donc le moment opportun pour agir sur l'irrigation.

Tableau 15. Etat hydrique du sol en rapport avec les relevés tensiométriques.

Mesures en centibars	Etat du sol
0-10	Sol saturé avec risque d'asphyxie
10-15	Sol ressuyé
15-50	Confort hydrique (RFU) - irrigation
50-100	Fin de la RFU (situation de stress)

Gendrier *et al.*, (1999) - Tron *et al.*, (2000).

Grace à ces relevés il est possible de fixer la fréquence des irrigations **(Tableau 16).**

Tableau 16. Pilotage de l'irrigation par relevés tensiométriques.

Paramètre à suivre	En goutte-à-goutte	En micro-aspersion
Fréquence	2 fois par semaine avant de déclencher l'irrigation	Variable par principe de la micro-aspersion
Valeurs tensiométriques en augmentation	Augmenter le temps d'apport	la période entre deux arrosages doit être réduite
Valeurs tensiométriques en réduction	Réduire le temps d'irrigation	les irrigations doivent être davantage espacées
Si les tensions chutent sur la sonde à 90 cm suite à de fortes précipitations	les apports d'eau doivent être fractionnés	la dose définie lors de la première irrigation doit être revue à la baisse.
Par l'irrigation, les tensions mesurées à 30 cm de profondeur doivent être maintenues autour de :	40 cb en sols sableux, 50 cb en sols limoneux, 60 cb en sols argileux.	60 cb en sols sableux, 70 cb en sols limoneux, 90 cb en sols argileux.

Tron *et al.*, (2000)

La durée maximale d'un apport d'eau est le temps écoulé entre le début de chute de tension et le début de l'irrigation. Il n y a pas lieu de renouveler l'arrosage tant que les tensions observées aux différents points ne dépassent pas celles qui ont été enregistrées avant l'apport précédent. Après chaque pluie, les tensions doivent être relevées

1-1-5- Limites du pilotage de l'irrigation par tensiométrie

Les tensiomètres peuvent présenter certaines imprécisions de mesure dues à un mauvais positionnement ou une usure prématurée du matériel.

1-2- Sondes capacitives

Les sondes capacitives permettent de déterminer l'état des réserves hydriques du sol à une profondeur donnée. La mesure de l'humidité volumique du sol (H_v) peut être effectuée soit par gravimétrie soit en utilisant la sonde à neutron ou la sonde TDR ((Time Domain Reflectrometry / réflectométrie en domaine temporel). L'utilisation des sondes capacitives est généralement limitée au domaine de l'expérimentation en raison du coût, de la complexité de leur utilisation ou de la dangerosité d'emploi, par exemple de la sonde à neutrons, qui nécessite par ailleurs, un étalonnage **(Photos 17 et 18),** c.-à-d. l'établissement d'équations de corrélations entre les comptages de la sonde et des mesures gravimétriques, effectuées pour différents états hydriques du sol. Les échantillons de terre sont prélevés à la tarière et pesés frais au moyen d'une balance de précision 1/100, puis séchés à 105°C jusqu'à constance du poids (48 heures). La valeur de H_v est donnée par :

$$H_v = H_m \times d_a \quad \text{avec } H_m = [(P_f - \text{Tare}) - (P_s - \text{Tare}) / (P_s - \text{Tare})] \times 100$$

H_m est l'humidité massique et d_a est la densité apparente du sol ou masse volumique apparente

Les valeurs de d_a sont déterminées à partir d'échantillons de terre non perturbés, prélevés à différentes profondeurs au moyen d'anneaux en acier de 100 cm^3 (montés à l'extrémité d'une tarière courte). Ils sont pesés frais avec leur tare puis séchés à 105°C. La densité apparente d_a est exprimée par :

$$d_a = P_s/V$$

P_s étant le poids sec de l'échantillon de sol.

Remarques

-Pour obtenir une mesure par couche de sol, creuser une tranchée et y prélever au fur et à mesure les échantillons.
-Déterminer d_a pour chaque horizon du sol afin de pouvoir disposer d'une valeur de la teneur en eau dans chaque tranche de sol. La variation de la texture du sol est à l'origine d'une variation de sa teneur en eau.
- Pour piloter au mieux l'irrigation, le bilan hydrique doit être associé à l'utilisation de relevés tensiomètriques.




Photo 17. Prélèvement d'échantillons de sol pour la détermination de son humidité volumique par gravimétrie.




Photo 18. Détermination de l'humidité volumique du sol au moyen de la sonde à neutrons (SOLO 25)

2- Mesures au niveau de la plante

2-1- Mesures micro-morphométriques au moyen du Système PEPISTA

La mesure des variations des dimensions de la tige ou des fruits au moyen de capteurs thermiques (système PEPISTA) permet de repérer le moment opportun d'apport de l'eau. Cette mesure dite **micro-morphométrique** est révélatrice de l'intensité de la transpiration de la plante et de la mobilisation de ses réserves en eau. Ce suivi permet de distinguer chez les fruits en croissance une phase diurne décroissante et une phase nocturne à croissance régulière. Au cours de la journée, la réduction du diamètre du fruit au-delà d'un certain seuil que l'on se fixe, indique que le sol ne fournit plus assez d'eau pour un fonctionnement normal de la plante. L'appareil (bio-programmateur) est capable de repérer cette chute de dimension et de lancer l'irrigation. La **photo 19** et la **figure 18** sont des exemples illustratifs de mesures micro-morphométriques.



Photo.19. Mesure des variations micro-morphométriques du diamètre du tronc in situ au moyen du système PEPISTA **(CEMAGREF, 1990).**

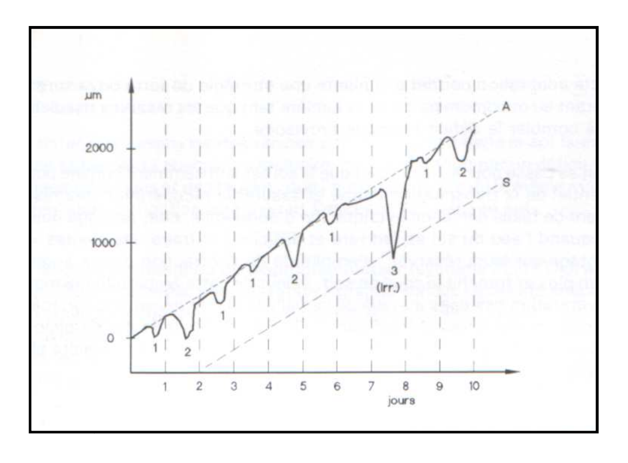


Fig.18. Variation du diamètre d'un fruit (citron) en cours de croissance **(CEMAGREF, 1990)**.

Les amplitudes diurnes marquées 1 correspondent à des demandes climatiques moyennes sans déficit d'eau dans le sol. Les amplitudes 2 correspondent à des demandes climatiques plus fortes mais normales. Dans le cas « 3 » il y a une forte demande climatique avec un déficit d'eau dans le sol, nécessitant l'irrigation. Au cours de la nuit séparant le 7^{e} et le 8^{e} jour, la plante n'est pas parvenue à récupérer la quantité d'eau qu'elle a perdue ce qui aboutit à une réduction de la dimension du fruit le 8^{e} jour. Le seuil de soif est franchit. Ceci marque une déshydratation tissulaire au-delà de laquelle la plante déclenche son mécanisme de régulation stomatique, c.-à-d. qu'elle ferme en plein jour ses stomates pour réduire sa transpiration au détriment de son efficacité photosynthétique. L'irrigation est déclenchée une fois le seuil de soif est atteint.

2-2- Température de surface du couvert végétal

La température de surface du couvert végétal est un indicateur de l'état hydrique de la plante, qu'on utilise pour piloter l'irrigation (cas des agrumes dans le cap-bon). Cette température dépend du refroidissement des feuilles suite à l'évapotranspiration, elle-même fonction de la disponibilité de l'eau dans le système sol-plante.

Pour un couvert évaporant en pleine activité, sans contrainte hydrique, la température de surface T_s est inférieure à la température ambiante de l'air T_a. L'écart de ces températures est proportionnel au régime d'évaporation. Lorsque la plante est en déficit hydrique, sa température de surface augmente ; son évapotranspiration est réduite par régulation thermique. Dans ce cas T_s devient supérieure à T_a. On mesure cette température au moyen d'un pistolet infra – rouge, généralement au voisinage du midi solaire. L'évolution de la différence (T_s-T_a) au cours de plusieurs journées est bien corrélée au bilan hydrique contrairement aux mesures ponctuelles qui sont sensibles aux variations instantanées des paramètres microclimatiques. Pour piloter l'irrigation on utilise le cumul des écarts journaliers (positifs).

L'application 14 présente un exemple d'utilisation de la sonde à neutrons pour le suivi de l'état hydrique du sol au niveau d'une jeune oliveraie.

Application 14

Travaux de recherches menés en Tunisie.

Utilisation de la sonde à neutrons pour le suivi de l'état hydrique du sol d'une jeune plantation d'oliviers Chétoui conduite sous irrigation de complément.

a – Répartition des tubes d'accès de la sonde à neutrons

Le suivi de l'humidité du sol a été réalisé en période d'irrigation moyennant des mesures à la sonde à neutrons (Modèle Solo 25), effectuées tous les 2 à 3 jours, en utilisant des tubes d'accès en PVC **(Masmoudi-Charfi, 2008)** implantés autour de trois oliviers Chétoui à une profondeur de 1,5 m. En raison de l'hétérogénéité du développement radiculaire et de celui de la canopée, l'emplacement des tubes a été minutieusement réfléchi et choisi **(Fig.19)**.

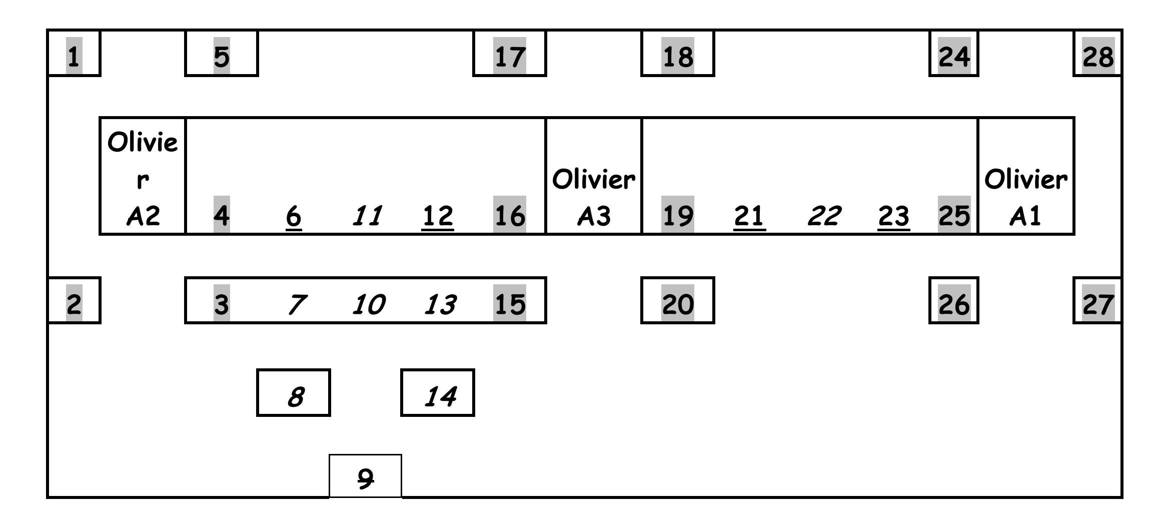


Fig.19. Distribution des tubes d'accès de la sonde à neutrons (numérotés de 1 à 28).

Les tubes ont été placés sous la frondaison des arbres (colorés en gris), sur la ligne entre deux oliviers (tubes portant un numéro soutiré) et au centre du carré formé par quatre oliviers (tube N°9). Les tubes placés sous les arbres **(Photo 20)** et sur la ligne entre deux oliviers sont représentés par trois et deux répétitions respectivement. A partir de ces mesures, l'humidité volumique (H_v) a été déterminée pour les différentes profondeurs après avoir étalonné la sonde neutronique. Le stock d'eau dans le sol a été estimé pour chaque tranche de sol jusqu'à une

profondeur 1,2 m. Pour une distance de 0,2 m, le stock est égal à deux fois la valeur de H_v exprimée en pourcentage.



Photo 20. Tubes d'accès de la sonde à neutrons placés autour du pied d'olivier.

b - Etalonnage de la sonde à neutrons SOLO 25

L'étalonnage consiste à déterminer des relations entre les comptages de la sonde et l'humidité volumique du sol. Les relations établies entre H_v, déterminée par gravimétrie et le quotient (N*) égal au rapport de la mesure au sol (N_{sol}) par la mesure dans l'eau (N_{eau}), présentent des coefficients de corrélation variant de 0,69 à 0,83 pour la tranche de sol allant de 0,2 à 1,0 m de profondeur (Fig.20). Pour la couche de surface nous avons utilisé les valeurs de l'humidité déterminées par gravimétrie.

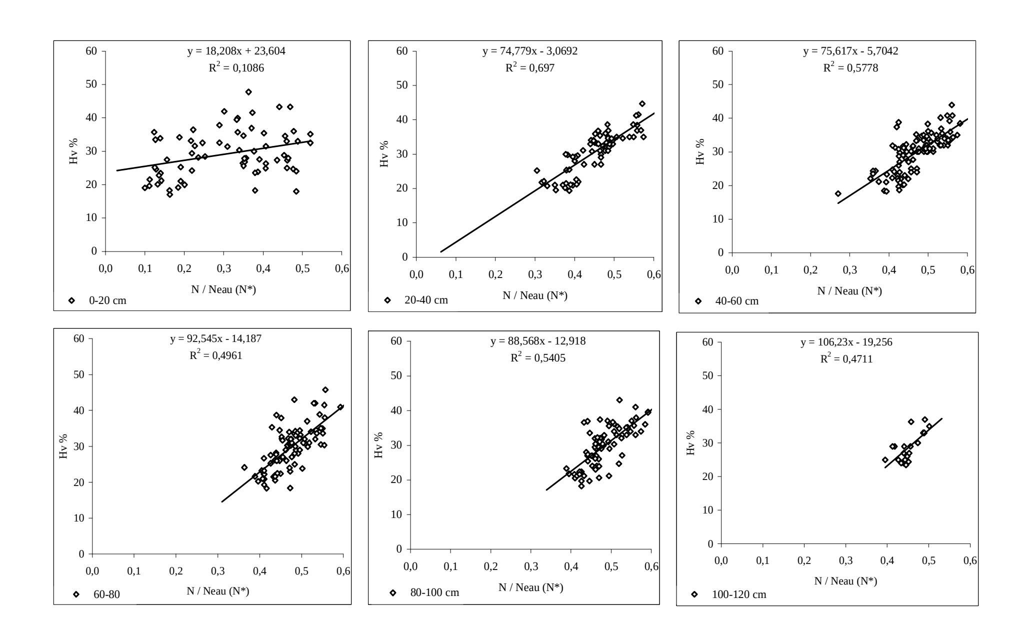


Fig.20. Courbes d'étalonnage de la sonde à neutrons (SOLO 25) pour différentes profondeurs, exprimant l'humidité volumique du sol (H_v, %) déterminée par gravimétrie en fonction du quotient N* égal au rapport entre les mesures dans le sol (N) par les mesures dans l'eau (N_{eau}), effectuées au moyen de la sonde à neutrons SOLO 25.

Remarque

La figure représentant la tranche de sol 0-20 cm est donnée à titre illustratif, montrant une faible 'corrélation' entre les comptages de la sonde et l'humidité déterminée par gravimétrie.

c – Analyse des données

Pour étudier l'évolution du stock d'eau dans le réservoir sol, les mesures ont été organisées en quatre groupes selon leur distance du tronc (**Fig.21**).
- Réservoir G1 est représenté par les mesures effectuées dans un rayon de 1,4 m du tronc. Il caractérise la zone d'irrigation ombragée par la frondaison.
- Réservoir G2 regroupe les tubes situés dans un rayon de 2 m, à la limite de la zone des racines mais non couverte par la frondaison.
- Réservoir G3, regroupe les mesures faites en dehors de la zone des racines et jusqu'à mi-distance de deux oliviers, à une distance comprise entre 2,2 et 2,8 m du tronc.
- Réservoir G3 est représenté par le tube situé à 4,2 m du tronc au centre du carré formé par quatre arbres voisins. Il est directement exposé au rayonnement solaire et reçoit uniquement les apports d'eau de pluie.

d – Evolution du stock d'eau dans les 4 compartiments à l'échelle de la campagne

Les stocks d'eau ont varié considérablement en fonction des saisons et en rapport avec l'activité de la plante et l'importance de la demande climatique. La **figure 21** représente l'évolution du stock d'eau durant la campagne de mesures en rapport avec les évènements pluvieux et l'irrigation.

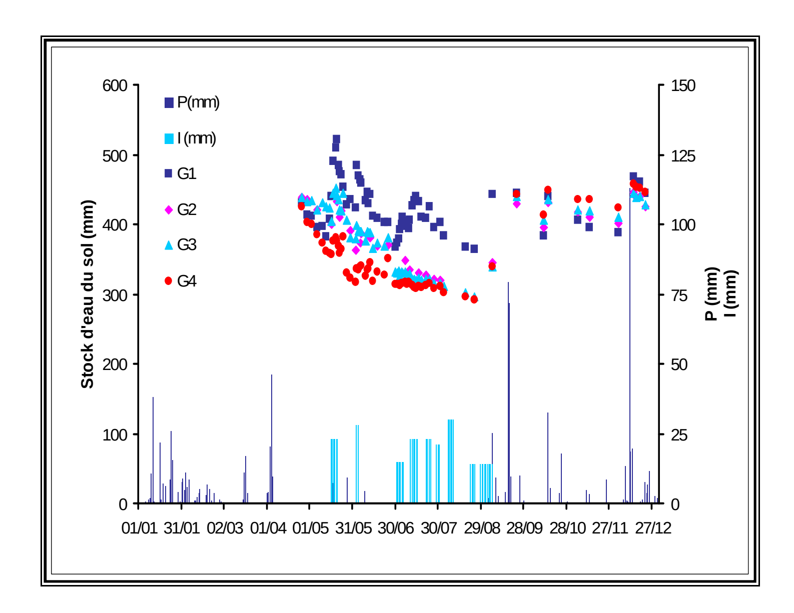


Fig.21. Evolution du stock d'eau dans le sol (mm) durant l'année 2003 au niveau des 4 zones considérées. G1: 1,4 m du tronc, G2: 2m du tronc, G3: 2,2 à 2,8 m du tronc, G4: 4,2 m du tronc. Les bâtonnets représentent les lames d'eau de pluie (P) et d'irrigation (I).

- En période de pluie, les stocks d'eau ont augmenté dans tous les compartiments avec une homogénéisation de l'état hydrique du sol.
- Au cours de la saison d'irrigation, le stock a évolué en dents de scie avec une tendance à la baisse, en réponse à l'alternance des périodes d'apport de l'eau et d'arrêt de l'irrigation suite à

une panne (Juillet -Août). Les écarts importants observés entre les 4 groupes résultent de l'apport localisé de l'eau (irrigation) et de l'importance relative des processus d'évaporation et de transpiration au niveau de chaque réservoir. L'humidité est plus élevée sous la frondaison qu'ailleurs. Ses valeurs ont oscillé entre 30% et 40% en fonction de la profondeur.
- En l'absence d'apport d'eau par la pluie ou par l'irrigation, le sol entre dans une phase de dessèchement. Le profil est déplacé davantage vers la profondeur du sol. L'humidité au niveau des réservoirs G1 (sous la frondaison) et G4 (hors de la portée des racines) est plus faible que celle qui est observée au niveau des réservoirs intermédiaires sous l'effet, respectivement, des processus de transpiration (G1) et d'évaporation de l'eau du sol (G4).
- Les variations les plus importantes de l'humidité du sol sont observées au niveau de la tranche 0-40 cm dans toutes les situations.

Ces variations sont liées aux différents processus évaporatoires et à l'activité radiculaire.
-Le groupe 1 a présenté les valeurs les plus élevées entre mi mai et début septembre en raison de l'apport localisé de l'eau. Ce groupe est principalement soumis à l'absorption radiculaire en vue de subvenir à l'appel de transpiration et aux besoins du métabolisme. En absence d'apport de l'eau, cette zone présente des taux d'humidités faibles.
-Les groupes G3 et G2 ont présenté des valeurs intermédiaires du fait qu'ils ne sont pas soumis à l'irrigation et bénéficient d'un ombrage partiel en cours de journée, qui réduit la composante évaporation du sol. Cette zone est soumise à l'effet de la pluie mais également sujette aux transferts latéraux de l'eau en raison de la présence d'une certaine masse de racines.
-Le groupe 4 a présenté un stock plus faible en raison de l'absence de l'irrigation et de l'effet de l'évaporation directe du sol, mais il a dépassé tous les autres groupes en période de pluie à cause de l'absence des racines et la baisse de l'évaporation du sol en cette période de l'année.

e- Conclusion et Recommandations

Le fonctionnement du réservoir sol varie selon la position par rapport au tronc en raison de l'hétérogénéité de la répartition des racines même en dessous de la canopée et de la variation de la couverture du sol. **Chaque compartiment du sol doit être considéré comme un réservoir à part entière, en particulier pour la zone d'irrigation et qui se distingue nettement des autres. La complexité du système rend difficile l'établissement du bilan hydrique pour l'ensemble de la parcelle** comme il a été rapporté dans d'autres travaux notamment ceux de **Rhaiem (1971), Riou (1978) et Villagra *et al.,* (1995).** La consommation en eau de la culture peut être déterminée en intégrant des mesures complémentaires, par exemple la mesure du flux de la sève brute.

Chapitre 11

L'IRRIGATION DEFICITAIRE

1-Introduction

L'irrigation de l'olivier est pratiquée dans la plupart des plantations de manière empirique. On assiste alors à deux situations: où l'eau est insuffisante pour combler le déficit climatique et permettre à la plante de croitre et de produire aisément, ou au contraire, les apports sont trop copieux et d'énormes quantités d'eau sont perdues. Nous avons publié en 2006 un document technique, présentant une estimation des besoins en eau de l'olivier en fonction de l'âge et de la couverture du sol **(Masmoudi-Charfi, 2006).** Cependant, soucieux d'économiser plus d'eau, des recherches ont été réalisées dans différentes régions de la Tunisie notamment à Kairouan **(Chehab, 2007),** Sfax **(Masmoudi-Charfi *et al.*, 2010),** Mornag et Nabeul pour étudier la possibilité de réduire les apports d'eau d'irrigation sans affecter significativement la production et ce en utilisant le concept de l'irrigation déficitaire, qui a été utilisé en Espagne **(Mickelakis, 1986 ; Sole-Riera, 1989 ; Goldhamer *et al.*, 1993 ; Fernandez *et al.*, 2003 ; Connor, 2006 ; Moriana, 2006 ; Mriana *et al.*, 2003)** pour mieux contrôler le développement végétatif des arbres et leur productivité.

2- Concept de l'irrigation déficitaire

Principe: fournir une quantité d'eau d'irrigation inférieure aux besoins optima de l'arbre.

But: Maintenir la production à un niveau acceptable avec une économie de l'eau.

Il existe plusieurs stratégies:

- DI *déficit irrigation* : appliquer des quantités d'eau inférieures au besoin optimum au cours du cycle de l'olivier ou d'une partie de ce cycle sans affecter significativement le produit fini.

- PRI *partial root irrigation* : appliquer l'eau d'un côté ou de l'autre des racines. Le manque d'eau temporaire du côté non irrigué produirait des signaux de stress qui semblent stimuler la production de fleurs et de fruits.

3-Objectif spécifique des travaux réalisés

Etudier le comportement végétatif, fructifère et productif de différentes variétés d'olivier cultivées en intensif vis-à-vis de l'irrigation déficitaire.

4- Méthodologie globale

Appliquer différents traitements hydriques avec des doses allant de 20%ET_c à 100%ET_c et évaluer la réponse physiologique et agronomique de plusieurs variétés sous des conditions environnementales diverses. Les besoins en eau de la culture (ET_c, mm) ont été estimés dans tous les cas à partir de la méthode de la FAO (**Allen *et al.*, 1998**).

5- Protocoles expérimentaux

Les expérimentations réalisées à Mornag, Nabeul et Taoues (Sfax) relatives à l'irrigation déficitaire sont détaillées dans les tableaux suivants.

Tableau 17. Conditions des essais et traitements hydriques appliqués à Mornag, Nabeul et Taoues

Ferme de l'INAT Mornag (2004-2007)	**Domaine de Taoues Sfax (2008-2009)**	**Ferme de l'INRGREF Nabeul (2010-2012)**
Latitude 36,8°, Altitude 10 m	Latitude 34°, Altitude 3 m	Latitude 36,6°, Altitude 10 m
Climat subhumide inférieur Déficit climatique : 750 mm/an	Climat semi-aride Déficit climatique : 1300 mm/an	Climat subhumide inférieur Déficit climatique : 800 mm/an
ET_o = 1200 mm/an	ET_o = 1660 mm/an	ET_o= 1200 mm/an
Pluie moyenne = 450 mm/an	Pluie moyenne = 250 mm/an	Pluie moyenne = 450 mm/an
Sol limono-argilo-sableux RU = 240 mm	Sol sablo-limoneux RU= 60 mm	Sol limono-sableux
ET_c = 391-445 mm selon année	ET_c = 580 mm/an	ET_c = 420 mm/an
Système goutte à goutte 2 rampes (+ vannes) 4 goutteurs/arbre 4 l/h/goutteur Bonne qualité de l'eau	Système goutte à goutte 2 rampes 4 à 8 goutteurs/arbre 4 à 10 l/h/goutteur Bonne qualité de l'eau	Système goutte à goutte 2 rampes 1 goutteur tous les 33 cm 4 l/h/goutteur Eau de 2-3g/litre de RS
Variétés : Chétoui, Meski, Picholine et Manzanille	Variétés : Chétoui, Chemlali, Coratina, Picholine et Manzanille	46 variétés, 3 arbres/variété
278 pieds/ha	204 pieds /ha	278 pieds/ha
4 blocs de 112 arbres chacun	5 Blocs de 9 arbres chacun	46 blocs de 3 arbres chacun
T1 : 100%ET_c, 15 jours/mois T4: 100%ET_c, tous les jours 2 rampes T2:50%ET_c, 2 rampes, t/2 T3: 50%ET_c, 1 rampe **T1 = T4 = 200 mm /saison** **T2 = T3 = 100 mm / saison**	T1: 20% ET_c, 4 goutteurs de 4 l/h, T2: 50% ET_c, 4 goutteurs de 10 l/h T3: 100% ET_c, 8 goutteurs de 10 l/h	70% ET_c Irrigation 2 fois/semaine, 3 goutteurs de 4 l/h/pied 2 rampes Dose appliquée : 6m^3/pied/saison

Tableau 18. Paramètres suivis à Mornag, Nabeul et Taoues

Ferme de l'INAT Mornag (2004-2007)	Domaine de Taoues Sfax (2008-2009)	Ferme de l'INRGREF Nabeul (2010-à ce jour)
ET_o journalier Hauteur de l'arbre, Périmètre du tronc Circonférence de la frondaison Longueur des rameaux Diamètre des olives Potentiel hydrique (CP Scholander) Humidité du sol (SN - SOLO 25) Production d'olives Bois de taille Productivité, EUE	ET_o journalier Diamètres du tronc et de la frondaison Hauteur de l'arbre, Longueur des rameaux Floraison - Nouaison Résistance stomatique (poromètre : AP4 Delta-T Devices' porometer) Potentiel hydrique (chambre à pression, pms Instrument co.), Humidité du sol (Gravimétrie) Contenu relatif en eau des feuilles Production d'olives EUE	ET_o journalier Croissance de l'arbre, Croissance des rameaux Floraison Humidité du sol Contenu relatif en eau des feuilles Production d'olives EUE Taux de couverture du sol (surface projetée de la frondaison)
3 arbres / variété 4 rameaux / arbre 5 fruits / arbre	3 arbres/variété/traitement 4 rameaux / arbre 5 fruits / arbre	





Chambre à pression :

Mesure du potentiel hydrique



Poromètre

Mesure de la résistance stomatique

Photo 21. Matériel de mesure du potentiel hydrique et de la résistance stomatique.

6- Résultats

6-1- Essai de Mornag

Le tableau ci-dessous présente les réponses à l'eau pour les paramètres de croissance et de production. Seules les réponses significatives au seuil de 5% sont rapportées.

Tableau 19. Valeurs moyennes des paramètres de croissance (accroissement annuel en %) et de production obtenues à Mornag.

	100%ET$_c$ Irrig.15j/mois	**50%ET$_c$ 2 rampes**	**50%ET$_c$ 1 rampe**	**100%ET$_c$ Irrig. quotidienne**
Hauteur de l'olivier	**19,6**	14,75	14,1	16,4
Ecart-type	**6,9**	1,3	14,7	7,3
Diamètre de la frondaison	8,8	8,3	**14,1**	11,6
Ecart-type	2,4	2,7	**3,1**	3,3
Diamètre du tronc	3,48	2,2	**3,88**	1,61
Ecart-type	0,9	1,99	**4,06**	3,54
Longueur des rameaux	48,78	45,83	**54,14**	49,66
Ecart-type	12,33	8,98	**15,00**	12,27
Diamètre de l'olive	3,99	3,9	**4,26**	3,62
Ecart-type	0,37	0,72	**0,76**	0,09
Rendement (T/ha)	2,84	2,69	**3,06**	3,74
Ecart-type	1,58	1,14	**2,31**	0,86
Bois de taille (Kg/ha)	**15,3**	13,8	13,4	14,8
Ecart-type	**1,7**	1,0	1,7	2,7
EUE (Kg/m^3)	1,63	**3,14**	2,87	0,98
Ecart-type	1,00	**1,81**	2,31	0,62
Indice de productivité (Kg d'olives/m^{3}de frondaison)	0,52	**0,80**	0,66	0,45
Ecart-type	0,39	**0,28**	0,54	0,34

Les meilleures réponses à l'eau ont été obtenues pour l'indice de productivité, le diamètre des olives, du tronc et de la frondaison, la longueur des rameaux, le rendement et l'EUE sous restriction hydrique contrôlée (RH : 50%ET$_c$) indépendamment du mode d'apport de l'eau (2 rampes ou 1 rampe). Pour la production de bois de taille et la hauteur de l'olivier, les meilleures réponses à l'eau sont fournies sous pleine irrigation (PI : 100%ET$_c$). Cependant, ces moyennes cachent des variabilités entre les variétés comme le montre le **tableau 20**.

Tableau 20. Traitements donnant les meilleures réponses à l'eau en fonction de la variété.

	Hauteur olivier	Diam. Frond.	Diam. Tronc	Long. Pousse	**Diam. Fruit**	Indice Productivité	EUE	Bois Taille	Production
Manzanille	PI/RH	RH	RH	RH	**RH**	RH	RH	PI	PI
Chétoui	PI	RH	RH	PI	**RH**	RH	RH	PI	RH
Meski	PI	RH	PI	PI	**RH**		RH	PI	PI
Picholine	RH	PI	PI	PI	**RH**	RH	RH	PI	RH

NB : PI : Pleine irrigation (T1 ou T4) et RH : Restriction hydrique contrôlée (T2 ou T3).

L'indice de productivité, le calibre du fruit et l'EUE sont plus élevés sous régime restrictif (RH) chez toutes les variétés. La production de bois de taille et la longueur des pousses sont privilégiées sous pleine irrigation.

6-2- Essai de Taoues

Les meilleures réponses à l'eau pour les paramètres de croissance, de fructification et de production sont présentées dans les **tableaux 21, 22 et 23**. Les résultats montrent des réponses controversées en fonction des variétés. Les meilleures EUE ont été obtenues avec Picholine, Coratina, Manzanille et Chétoui avec 20%ET_c et pour Chemlali avec 50%ET_c. **L'apport d'une quantité plus importante d'eau ne se traduit pas nécessairement par un meilleur état hydrique de la plante.** Chez la variété Coratina par exemple, la production augmente seulement de 17% en passant de 20%ET_c à 100%ET_c. De plus, les traitements les moins irrigués ne présentent pas les valeurs les plus faibles du potentiel hydrique. Le meilleur état hydrique est obtenu avec 50%ET_c pour Picholine et Manzanille, 20%ET_c pour Chemlali et 100%ET_c pour Coratina et Chétoui.

Tableau 21. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de croissance

	Diam. Frondaison	Nb max feuilles	Périm. Tronc	Long. Pousse	Diam Fruit	Diam Rameau	Nb EN	Nombre EN
Manzanille	T3	T2	T3	T3 = T2	T2	T3	T3	T3
Chétoui	T3	T3	T2	T2	T2	T1	T3	T3
Coratina	T3	T3	T2	T3	T1=T3	T1	T1	T1
Picholine	T2	T1	T3	T2=T3	T2	T3	T2	T2
Chemlali				T3		T1	T3	T3

La réponse à l'eau dépend de la charge en fruits et de la capacité de la variété à valoriser cette eau comme il l'a été rapporté dans les travaux de **Psyllakis (1973)** et **Michelakis (1990)**.Le niveau maximal de la résistance stomatique est observé vers midi avec des valeurs de l'ordre de 4 s/cm. Les variétés Chemlali et Chétoui montrent un écart significatif entre les 3 traitements avec des résistances plus faibles pour 100%ET_c. **Lorsque l'eau est disponible, la variété Chemlali semble consommer plus d'eau que les autres**. La charge en fruits pourrait expliquer ce comportement. La production moyenne de Chemlali est de 33,3 Kg/arbre contre 14,3 Kg/arbre pour Picholine par exemple. Un niveau plus bas de la résistance au début et à la fin de la journée est observé pour les traitements 100%ET_c et 50%ET_c.

Tableau 22. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de fructification

	Nb max Fleur /rameau	Nb fleur /cm	Nb fleur/ inflorescence	Nb inflorescence /cm	Taux de Nouaison	Nb fruit /cm
Manzanille	T2 etT3	T2	T3	T3	T1	
Chétoui	T3	T2	T2	T3		T2
Coratina	T3		T2	T3	T3	T3
Picholine	T3		T3	T3		
Chemlali	T3	T2		T2	T3	T3

Le **tableau 23** récapitule les paramètres de production.

Tableau 23. Réponse à l'eau en fonction de la variété pour les paramètres de production.

	Production de 2 ans (kg/arbre)			EUE (Kg/m^3)		
	20% ETc	50% ETc	100% ETc	20% ETc	50% ETc	100%ETc
	120 mm	290 mm	582 mm	120 mm	290 mm	582 mm
Manzanille	8,2 b	3,6 d	11,5 b	1,9 b	0,35 d	0,55 b
Chétoui	6,7 c	3 e	8,95 c	1,55 c	0,3 e	0,4 c
Coratina	15,3 a	6,3 c	7,9 d	3,55 a	0,55 c	0,35 d
Picholine	3,2 d	17,9 a	16,95 a	0,75 d	1,7 a	0,8 a
Chemlali	16,7 a	8,5 b	12,65 b	3,9 a	0,8 b	0,6 b

NB : Les chiffres avec des lettres différentes indiquent un écart statistique significatif entre les variétés pour un même traitement au seuil de 5%.

6-3- Essai de Nabeul-Oued Souhil

-Croissance des olives

Bien que les besoins globaux en eau aient été largement couverts, un manque d'eau a été ressenti en période de nouaison et de grossissement rapide des fruits (entre le 25/5 et le 10/6). Cette situation a généré un faible accroissement relatif des fruits (+19,1%) suite à la rétraction du diamètre des olives au cours de la phase 1 de leur croissance chez un certain nombre de cultivars notamment Koroneiki (-1,4%), Branquita (-7,7%) et Sayali (-20,7%). La variété la plus touchée est Lucques (-22,1%). Un maximum d'accroissement a été noté chez la variété Picholine avec +53,6% alors que le minimum de +3,5% a été noté chez la variété Gemri **(Fig.22)**.

L'amélioration des conditions hydriques au cours de la Phase 2 de croissance des olives a engendré une amélioration de l'état général de l'ensemble des arbres. Les variétés qui ont présenté une rétraction du diamètre au cours de la phase 1 ont montré une croissance des fruits importante avec un accroissement relatif de +18,4% chez Koroneiki, +35,7% chez Branquita, +55,4% chez Sayali et de +62% chez Lucques. L'accroissement relatif moyen a été de 38% avec un maximum de 96,8% enregistré chez la variété Madurel et un minimum de 5,1% noté chez la variété Rkhami. Un accroissement de l'ordre de 32% a été observé chez la Meski, 10,8% chez la Chétoui, 15,4% chez la Chemlali et 35,7% chez la Picholine. A la mi-octobre, les variétés Ayvalik, Dhahbia, Madurel, Barouni et Gtar ont achevé plus de 80% de la croissance de leurs fruits.

Une baisse importante de l'humidité du sol a été notée au cours de la phase 1 avec un minimum atteint en juillet. A la fin de la saison d'irrigation un excès d'apport de l'eau a été enregistré, relevant les teneurs en eau à leurs valeurs maximales.

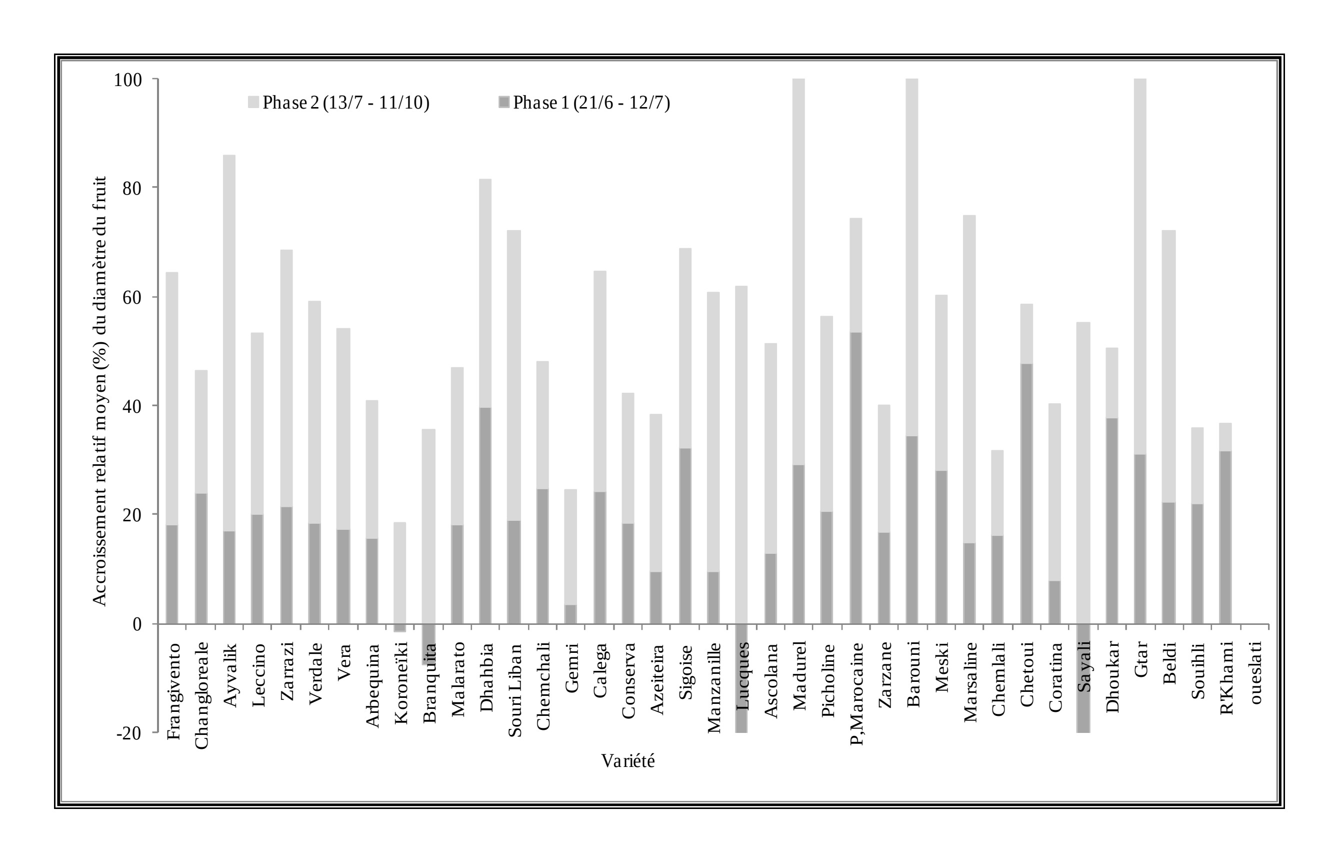


Fig.22. Accroissement du calibre des fruits au cours des phases 1 et 2 selon la variété.

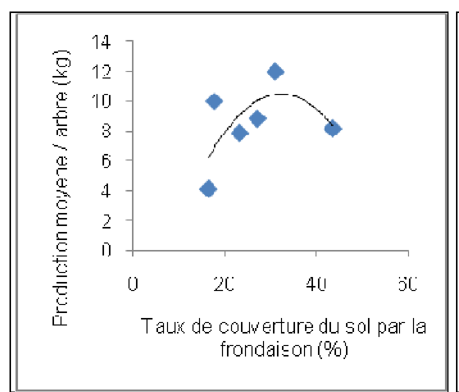
- Efficience de l'utilisation de l'eau

<u>- en terme de croissance en diamètre de l'olive</u> : La valeur moyenne est de 0,29 cm/m^3 d'eau d'irrigation appliqué. Les valeurs maximales et minimales sont respectivement de 0,44 cm/m^3 et de 0,14 cm/m^3. Des valeurs supérieures à 0,35 cm/m^3 ont été observées chez les variétés Zarrazi, Beldi, Souri Liban, Barouni, Meski et Marsaline caractérisées par un gros calibre avec un poids frais moyen allant de 6g à 12g à maturité.

<u>-en termes de production</u> : Les valeurs ont varié de 0,7 à 2,1 Kg/m^3 d'eau apportée. La variété Chemlali est la plus performante, suivie par les cultivars Koroneiki et Calegua, puis Arbéquina.

- Taux de couverture du sol et production

La production et l'EUE augmentent de façon linéaire et positive lorsque la couverture du sol augmente. Ceci s'explique par l'augmentation de la surface foliaire et donc une disponibilité plus importante d'assimilats qui permettent une meilleure alimentation de l'arbre aussi bien sur le plan minéral qu'hydrique (Fig.23). Mais au-delà d'une couverture de 30-35 % la production et l'EUE ont baissé. Une végétation importante (occasionnée par exemple par une mauvaise taille) expliquerait cette baisse de production, laquelle est étroitement liée à l'éclairement et à une bonne répartition de la lumière au sein de l'arbre.



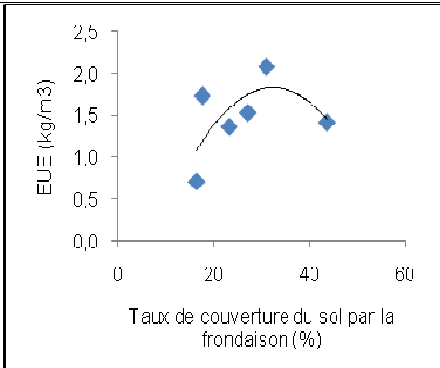


Fig.23. Relation entre le taux de couverture du sol par la frondaison (%), la production moyenne de l'arbre (Kg) et l'EUE (Kg/arbre) chez quelques variétés étudiées.

7-Conclusions

- La répartition de l'eau en fonction du stade de développement de l'olive est un facteur déterminant de la taille des fruits à maturité. Les possibilités de récupération du fruit sont possibles dans une certaine mesure lorsque l'eau devient disponible à un stade ultérieur, en particulier pour les fruits à gros calibre.

-Le taux de couverture du sol, et donc l'importance du système foliaire, est un facteur déterminant dans l'efficacité d'utilisation de l'eau. A ce titre il est nécessaire de réviser les valeurs du coefficient K_r relatif à la couverture du sol et qui est introduit dans l'équation de détermination des besoins en eau de la culture et de ne pas utiliser pour toutes les variétés (valeur moyenne pour toute la plantation multi variétale) un coefficient unique. Du point de vue pratique ceci est difficile à réaliser lorsqu'on a affaire à une parcelle multi variétale.

Chapitre 12

L'IRRIGATION FERTILISANTE

1-Exportation des éléments minéraux

Comme toute espèce ligneuse, l'olivier n'échappe pas aux lois générales de la nutrition minérale. Grâce à son système radiculaire, l'arbre puise dans le sol les éléments nutritifs nécessaires pour couvrir ses besoins en nutriments et ce pour la formation de sa charpente, la production, le renouvellement des pousses …etc. Ces prélèvements mobilisent chaque année une quantité plus ou moins importante d'éléments majeurs (N, P et K), d'éléments secondaires (Ca, Mg et S) et d'oligo-éléments (Fe, Zn, Mn, Cu, Bo, etc...), mais au vu de la longévité de l'arbre, ces exportations présentent une masse considérable d'éléments minéraux, qu'il faut restituer à temps et en quantités adéquates.

Le contrôle de la nutrition minérale de l'olivier et la détermination de ses besoins en éléments fertilisants se fait à travers **le diagnostic foliaire** (analyse minérale de certaines parties de l'arbre notamment feuilles et fleurs), qui a été mis au point vers les années 50 pour compléter l'analyse chimique au sol (Cottenie *et al.,* 1983). Cette dernière permet d'évaluer la richesse du sol en éléments nutritifs mais elle ne permet pas d'estimer leur disponibilité à la plante. L'interprétation du diagnostic foliaire se base sur la comparaison des valeurs obtenues avec des **normes** qui sont établies après plusieurs années d'observations et qui intègrent les variations nutritionnelles dues aux facteurs influençant l'alimentation minérale (Tableau 24). **Le seuil critique** indique la teneur de la feuille en un élément donné, en deçà de laquelle la plante sera en situation de carence en cet élément.

Tableau 24. Normes d'interprétation du diagnostic foliaire
(Échantillons de feuilles prélevés en hiver).

Elément (teneur par rapport à la matière sèche)	Seuil critique
N (%)	1,4
P (%)	0,07
K (%)	0,5
Ca (%)	0,2
Mg (%)	0,06
Bo (mg/kg)	14
Fe (mg/kg)	40
Cu (mg/kg)	1,5
Mn (mg/kg)	5
Zn (mg/kg)	4

Loussert et Brousse, (1978).

Sur la base des quantités de minéraux exportés annuellement **(Rejeb et Bouaziz, 1981 ; Braham, 1997 ; Xiloyannis, 2002 ; Gargouri et Mhiri, 2003 ; Masmoudi-Charfi et Ben Mechlia, 2009)**, un calendrier de fertilisation est établi.

Le **tableau 25** donne un ordre de grandeur des quantités de minéraux majeurs (N, P, K) exportés dans les différents organes de l'olivier, sachant que les exportations de la partie souterraine et de la croissance annuelle aérienne sont particulièrement difficiles à estimer. Pour les vergers en pleine production, l'exportation en fruits est quasiment équivalente à l'exportation des autres organes de la plante.

Tableau 25. Exportations de l'olivier en éléments nutritifs majeurs selon l'organe.

Organe	Eau %	N%	P_2O_5%	K_2O%	Ratios		
					N	**P**	**K**
Racine secondaire	37,7	0,33	0,113	0,402	2,9	1,0	3,5
Racine primaire	45,5	0,37	0,123	0,477	3,0	1,0	3,8
Tronc	32,3	0,26	0,070	0,219	3,7	1,0	3,1
Charpentière	31,9	0,29	0,090	0,354	3,2	1,0	2,9
Branche	27,4	0,23	0,099	0,291	2,3	1,0	2,9
Rameau	40,3	0,64	0,179	1,000	3,5	1,0	5,5
Feuille 1 an	42,7	1,63	0,271	0,994	6,0	1,0	3,6
Feuille 2 ans	40,5	1,24	0,201	0,679	6,1	1,0	3,4
Fruit vert	60,6	0,90	0,333	2,760	2,7	1,0	8,3
Fruit crépu	46,1	0,97	0,397	3,220	2,4	1,0	8,1

Llamas, (1984).

1Kg de fruits exporte 10 g d'azote alors qu'un 1Kg de feuilles exporte 15 g d'azote.

2- Pratique de l'irrigation fertilisante: Matériel utilisé pour l'injection des éléments minéraux

L'irrigation au goutte à goutte offre la possibilité d'amener directement au niveau des racines des engrais équilibrés et directement assimilables au moment opportun. Il existe différentes méthodes de distribution des engrais: **le réservoir fermé ordinaire, l'injecteur Venturi et la pompe à injection**.

2-1- Réservoir d'engrais liquide (fermé)

Ce réservoir résistant à la pression du système, est connecté par une dérivation à la conduite d'alimentation de l'ouvrage de tête. Il est réglé par la pression différentielle créée par une vanne partiellement fermée, placée sur la conduite entre l'entrée et la sortie du réservoir. Une partie du débit est dirigée vers la conduite d'entrée du réservoir, où il se mélange avec la solution de fertilisants, puis la dilution est injectée dans le système. Les taux de dilution et d'injection ne sont pas constants. La concentration d'engrais est élevée au début et devient faible en fin d'opération. Toutefois, cet appareil est encore d'usage en raison de son faible coût et de sa fabrication aisée.

2-2- Injecteur Venturi

Cet injecteur fonctionne grâce à une différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'injecteur. Par conséquent, il est installé sur une dérivation placée sur une cuve ouverte contenant la solution de fertilisant. Le taux d'injection est sensible aux variations de pression et de petits régulateurs de pression sont parfois nécessaires pour garantir une injection constante. Les pertes de charge dues à la friction sont d'environ 1 bar. Les injecteurs sont en plastique avec des taux d'injection de 40 à 2000l/h. Ils sont relativement bon marché, comparés à d'autres injecteurs.

2-3- Pompe à piston

La pompe est activée par la pression de l'eau dans le système et peut être directement installée en ligne. L'écoulement de l'eau dans le système active des pistons qui permettent à la pompe d'injecter la solution d'engrais stockée dans une cuve, tout en maintenant un taux d'injection constant. Ces injecteurs sont constitués de matière plastique résistante et durable. Ils sont plus chers que les injecteurs Venturi.

3- Engrais utilisables en irrigation fertilisante

La solution mère est la solution fertilisante ou solution nutritive qui sera injectée. La solution fille est l'eau d'irrigation fertilisée après injection de la solution mère.

La concentration de la solution mère est définie par le poids d'engrais dissout (g) par unité de volume de la solution mère (litre).

Le taux d'injection (l/m^3) est définit par le rapport de débit de la pompe doseuse (l/h) par le débit de la conduite d'irrigation (m^3/h).

La salinité de l'eau d'irrigation fertilisée est le produit de la concentration de la solution mère et du taux d'injection (l/m^3 ou pour mille). Il est recommandé de veiller à ce que la salinité reste inférieure à 4g/l. L'irrigation fertilisante est déconseillée lorsque la conductivité électrique de l'eau dépasse 3 dS/m.

La solution d'engrais sous forme liquide est injectée dans le système en quantité limitée mais de manière répétée et en continu pendant l'irrigation **(Phocaides, 2008).** Le débit de l'injecteur doit être réglé de manière à maintenir un taux constant durant tout le cycle d'irrigation, c.-à-d. en commençant la fertilisation au début de l'irrigation et en la finissant quelques minutes avant la fin. Il est nécessaire de commencer l'irrigation par de l'eau claire afin de chasser l'air du réseau et de garantir l'imbibition du bulbe. Ensuite, l'irrigation est poursuivie par l'injection d'engrais en veillant à ce que la concentration des engrais dans l'eau d'irrigation ne dépasse pas 2‰. Suite à l'injection d'engrais, il faut s'assurer que l'irrigation continue par de l'eau claire en quantité suffisante pour garantir le passage complet du fertilisant vers la zone radiculaire.

Le choix des engrais dépend de leur solubilité, de leur acidité, de leur compatibilité et de leur coût. Il est impératif de choisir des engrais solubles (solides ou liquides). L'élément communément appliqué est l'azote. Toutefois, l'application de phosphore et du potassium est courante pour certains modes de conduites (olivier en hyper-intensif).

3-1- Solubilité

Le degré de solubilité des engrais varie en fonction du leur type.
-Le nitrate de potassium (13-0-46) a une faible solubilité, d'environ 1:8 (1 kg d'engrais sec dans 8 litres d'eau).
-La solubilité du chlorure de potassium (0-0-62) est de 1:3, tandis que celle du nitrate d'ammonium (34-0-0) et du nitrate de calcium (15,5-0-0) est d'environ 1:1.
-Les engrais secs phosphoreux ont une plus faible solubilité que les nitrates, soit environ 1:2,5.

3-2- Acidité

La solution mère doit avoir un pH acide variant entre 5 et 6. L'acidité produite par diverses formes d'azote varie selon le type d'engrais, l'eau d'irrigation et le type de sol. Une vérification du pH du sol au début de la saison est nécessaire, puis à la fin de la saison d'irrigation.

3-3- Quantité

La quantité d'engrais à appliquer est répartie le long du cycle de croissance en fonction des besoins spécifiques de chaque stade phénologique mais également en fonction du nombre d'irrigations. **Il est primordial de comptabiliser les quantités naturellement présentes dans l'eau d'irrigation.**

Les engrais généralement utilisés sont: l'urée, l'acide nitrique (N), le nitrate d'ammoniac (N), l'acide phosphorique (P), le sulfate de potassium, le phosphate mono potassique (P K), le nitrate de potasse (N K) et le nitrate de calcium (N). Certains produits apportent aussi des éléments mineurs comme le sulfate de magnésie ou le nitrate de magnésie **(Tableau 26)**.

Tableau 26. Quelques engrais utilisables en irrigation fertilisante (en % du poids)

Engrais	Azote % (N)	Phosphore% (P_2O_5)	Potassium % (K_2O)	Autres sels %	Solubilité g/l à 0°C	Solubilité g/l à 25°C
Azote						
Sulfate d'ammoniaque	21	-	-	Sulfate	700	760
Urée	46	-	-	(59,2)	-	-
Nitrate d'ammonium	33,5	-	-	-	670	1190
Nitrate de calcium	15	-	-	CaO (27)	1180	2190
Nitrate de magnésium	11	-	-	MgO (15,7)	1000	2600
Acide nitrique	12,6	-	-	-	Liquide	Liquide
Phosphate						
DAP	24	60	-	-	225	400
Acide phosphorique	-	52	-	-	Liquide	Liquide
Potassium						
Sulfate de potassium	-	-	50	Sulfate	74	125
Nitrate de potassium	13	-	46	(45,6)	130	335
Acides composés						
4-8-12	4	8	12		Liquide	Liquide
12-4-6	12	4	6		Liquide	Liquide
6-8-8	6	8	8		Liquide	Liquide

Il est possible d'utiliser des engrais composés ou certains engrais (solides et liquides) contenant des oligo-éléments, des matières organiques (acides fulviques, acides humiques, acides aminés…). Les engrais azotés et potassiques ne posent généralement pas de problèmes d'injection. Cependant, lorsque l'eau est calcaire, les phosphates peuvent précipiter. Il faut utiliser dans ce cas un engrais phosphaté acidifiant (phosphate mono-ammoniaque).

4- Programme de ferti-irrigation

Un programme de fertilisation doit être établi pour chaque parcelle en tenant compte des conditions du milieu et de l'état et du potentiel productif des arbres. A titre d'exemple, le **tableau 27** présente un programme d'irrigation fertilisante d'une parcelle d'olivier à huile plantée à une densité de 204 arbres/ha selon l'âge **(Gargouri, 2012)**. Les besoins rapportés dans ce tableau sont exprimés pour les éléments N, P_2O_5 et K_2O à l'état pur. De ce fait il est nécessaire de prendre en considération la concentration de ces éléments dans les fertilisants commerciaux.

Tableau 27. Programme de ferti-irrigation d'une parcelle d'olivier selon l'âge **(Gargouri, 2012).**

Mois	Elément g/arbre	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10
Février	Azote	1	2	5	30	60	120	150	190	220
	P_2O_5	2	2	5	11	10	25	45	100	125
	K_2O	2	2	4	10	20	35	65	90	110
Mars	Azote	1	4	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2	5	5	18	35	70	160	180	205
	K_2O	2	4	7	20	35	70	125	180	220
Avril	Azote	2	4	7	40	80	160	200	250	290
	P_2O_5	2	5	5	18	35	70	160	180	205
	K_2O	2	4	10	20	35	75	125	180	220
Mai	Azote	2	5	7	45	90	180	220	275	320
	P_2O_5	2	2	5	11	20	45	100	115	125
	K_2O	4	7	10	20	35	70	125	180	220
Juin	Azote	3	6	10	60	120	240	300	375	430
	P_2O_5	2	2	5	11	20	45	100	115	125
	K_2O	4	10	15	30	55	110	255	360	440
Juillet	Azote									
	P_2O_5									
	K_2O	2	5	9	20	35	70	125	180	220
Aout	Azote									
	P_2O_5									
	K_2O	2	5	9	20	35	70	125	180	220
Septembre	Azote	2	7	8	50	100	200	250	300	345
	P_2O_5	2	2	5	5	10	22	55	70	70
	K_2O	2	20	20	55	110	220	510	710	855
Octobre	Azote	2	7	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2	-	2	2	5	10	20	20	20
	K_2O		20	15	55	110	220	510	710	855
Novembre	Azote	2	5	6	35	70	140	170	210	240
	P_2O_5	2			2	5	10	20	20	45
	K_2O		4	10	35	70	145	325	455	545

Avantages de la ferti-irrigation

- Gain de temps et d'effort.
- Disponibilité des engrais plus rapide et directement au niveau des racines.

Inconvénients de la ferti-irrigation

- Le coût : les prix des engrais solubles sont nettement supérieurs à ceux des engrais solides.
- Un déséquilibre se crée entre les zones irriguées (bulbe humide) et celles qui se trouvent en dehors des frondaisons.

Précautions à prendre

- Les équipements d'irrigation doivent être fabriqués en matériaux résistants à la corrosion.

-Le stockage des engrais à proximité des produits inflammables, des métaux, de la paille… peut présenter des risques d'explosion ou d'inflammation.

-Le stock de solution d'engrais doit être toujours dissout dans un contenant séparé, puis versé dans le réservoir d'amorçage.

-Les engrais solides doivent être très solubles et ne doivent pas former d'écume ni de sédiments susceptibles de causer des problèmes de colmatage des distributeurs lorsqu'ils sont dissouts dans l'eau.

-La solution doit toujours être agitée et bien brassée.

-Il faut retirer régulièrement les boues déposées au fond du réservoir.

-Le tuyau d'aspiration de l'injecteur ne doit pas reposer sur le fond du réservoir.

-L'eau chaude peut aider à dissoudre l'engrais desséché.

-Il ne faut pas utiliser les phosphates et les acides avec les sels de calcium ou de magnésium ou avec les eaux riches en ces éléments. Les eaux riches en calcium (> 70 mg/l) sont incompatibles avec les sulfates.

Application 15

Quantités d'engrais nécessaires en ferti-irrigation
Procédure de calcul

Données:

- **Culture:** X
- **Concentration d'engrais NPK:** 180-50-250 (exemple)
- **Type d'engrais disponible:**
  Nitrate d'Ammonium (33,5-0-0) NH_4NO_3
  Phosphate bi-ammonium DAP (16–48–0) $(NH4)_2HPO_4$
  Chlorure de potassium (0-0-60) KCl
- **Débit du système:** 23 m^3/h
- **Dose d'irrigation:** 18 m^3
- **Durée de l'application:** 1 heure et demi.

Question : Quantité d'engrais à utiliser ?

Réponse: Les phosphates et le potassium sont donnés sous forme d'oxydes, par conséquent ils sont convertis en éléments P et K en les multipliant par 0,43 et 0,83 respectivement.

Calcul des quantités d'engrais requises en grammes par m^3 d'eau :

K = 250 x 100 ÷ (60 x 0, 83) = 0,502 kg KCl
P = 50 x 100 ÷ (48 x 0, 43) = 0,239 kg $(NH_4)2HPO_4$
Cette quantité procure aussi 32 g de N.
N = (180-32) x 100 ÷ 33,5 = 0,424 kg NH_4NO_3

Ainsi pour 18 m^3 d'eau, les quantités exactes sont:
0,502 kg x 18 = 9,036 kg KCL
0,239 kg x 18 = 4,30 kg $(NH_4)2HPO_4$
0,424 kg x 18 = 7,63 kg NH_4NO_3

Les quantités d'eau requises pour la dilution des quantités d'engrais ci-dessus sont estimées en tenant en compte de la solubilité des engrais:

9,036 kg KCL x 3 l = 27 l
4,30 kg Ca (H_2PO_4) x 2,5 l = 10,75 l
7,63 kg NH_4NO_3 x 1 l = 7,63 l

La quantité minimale d'eau requise est de 45 l.

Si les engrais sont dilués dans 60 litres d'eau et que la durée d'irrigation est de deux heures, alors le taux d'injection doit être d'environ 40 à 45 litres/heure afin d'achever l'irrigation fertilisante en environ 1 h 25 mn et de faire passer de l'eau claire 15 min avant et 20 min après.

Application 16

Calcul des quantités d'engrais nécessaires en irrigation fertilisante: Cas de l'olivier conduit en intensif

Données:

• **Culture:** plantation d'olivier de 3 ha cultivée selon un écartement de 4m x 1,5m soit 6 m^2 par arbre et 1666 arbres/ha
• **Dispositif d'irrigation** : 1 goutteur de 4 l/h/arbre (soit un débit d'irrigation/ha de 4 l/h x 1666 = 6664 l/h/ha ou 6,7 m^3/h/ha et une pluviométrie fictive de 4 l/h/6 = 0,66 mm/h).
. **Besoins en eau journaliers** de 3 mm sont couverts par une irrigation par jour soit un temps d'arrosage de 3/0,66 = 4h30 mn.
. **Concentration des engrais: N:** 10 Kg/ha P_2O_5 : 10 Kg/ha KO : 13 Kg/ha
• **Type d'engrais utilisés dans l'exemple. Engrais utilisé en % du poids**

Phosphate mono-ammoniaque (N:12 - P_2O_5 :61 – KO:0)
Nitrate de potasse (N:13 - P_2O_5:0 - KO:46)
Ammonitrate (N:33,5 – P_2O_5 :0 – KO:0)

Question : Quantité d'engrais à utiliser et débit de la pompe doseuse ?

Réponse:

-Les poids respectifs des engrais nécessaires par ha sont les suivants:

P_2O_5 = 10 Kg/ha (12-61-0), soit 10/0,61 = 16,4 Kg avec un apport d'azote de 16,4 x 0,12=1,97 Kg
KO = 13 Kg/ha (13-0-46), soit 13/0,46 = 28,3 Kg avec un apport d'azote de 28,3 x 0,13 = 3,66 Kg
N =10 Kg/ha avec un apport par les engrais précédents de 5,63 Kg, soit un apport par l'ammonitrate N (33,5-0-0) de 10 – 5,63 = 4,37 Kg, le poids étant de 4,37/0,335 = 13 Kg

Débit de la pompe doseuse

Les postes d'irrigation ont une durée d'arrosage de 4h30mn.
L'injection des engrais doit être réalisée dans le début du poste.
Le temps de rinçage pour obtenir une eau claire dans tout le réseau est de 30mn.
Toute la solution mère doit être injectée dans 4 h ce qui conduit à un débit d'injection de :

Q = 510 l / 4 h = 127,5 l/h
On réglera le débit de la pompe doseuse à 130 l/h

Concentration de la solution mère = 173 Kg / 510 l = 0,34 g/l

Taux d'injection = débit de la pompe doseuse (l/h) / débit d'irrigation (m^3/h)
soit : 130/20 = 6,5 l/m^3

Salinité de l'irrigation = 0,34 x 6,5 = 2,2 g/l, valeur correcte.

Préparation de la solution mère :

On verse dans l'ordre : l'eau, le phosphore mono - ammoniaque, le nitrate de potasse et l'ammonitrate.

Poids des engrais à dissoudre :

-Phosphore mono-ammoniaque = 16,4 kg avec une solubilité de 37 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 16,4 / 37 = 44 l

-Nitrate de potasse = 28,3 kg avec une solubilité de 31,6 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 28,3 / 31,6 = 90 l

-Ammonitrate = 13 kg avec une solubilité de 192 Kg/100 l d'eau, soit un volume d'eau nécessaire de : 100 x 13 / 192 = 7 l

- Quantité totale est de 57,7 Kg.

- Volume total d'eau est de 141 l.

Le poids total d'engrais nécessaire pour l'ensemble du poste d'irrigation de 3 ha sera de:

Phosphate mono-ammoniaque	16,4x 3 = 49,2 Kg
Nitrate de potasse	28,3 x 3 = 84,9 Kg
Ammonitrate	13 x 3 = 39 Kg soit au total = 173,1 Kg

Par mesure de sécurité, le volume d'eau calculé sera majoré de 20% soit 170 l/ha.

Pour les 3 ha on aura besoin d'une quantité de solution mère est de 510 l.

Le débit d'irrigation est de 6,7 m^3/h/ha x 3 = 20 m^3/h.

Conclusion Générale

L'adoption d'une approche globale de gestion de l'eau en oléiculture est nécessaire ; elle exige que des mesures soient prises à tous les niveaux de gestion de l'eau, depuis les cultures jusqu'aux systèmes économiques et ce dans le but de relever les défis que pose déjà la pénurie de l'eau en Tunisie.

Au niveau de la parcelle, une irrigation bien maîtrisée permet de s'affranchir des conditions difficiles, mais l'installation doit être performante et les apports d'eau réfléchis afin d'éviter les pertes.

L'irrigation apporte une amélioration conséquente de l'efficience de l'irrigation et assure une meilleure valorisation des terres à travers la densification des cultures et/ou leur intensification et la diversification de la production. Cependant, compte tenu de l'interdépendance des conditions de cultures, il est nécessaire de connaitre tous les paramètres influents, en particulier les besoins en eau de la culture en fonction de l'évolution de son développement.

Ce manuel a présenté une masse de données qui permettent à l'oléiculteur averti de gérer au mieux l'eau au niveau de sa parcelle en tenant compte des contraintes techniques qu'il peut rencontrer. Cependant **l'oléiculteur doit nécessairement considérer l'irrigation comme une des composantes du paquet technique appliqué (taille, fertilisation, travail du sol, traitements phytosanitaires, récolte, …etc.) et non pas la seule.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abid-Karray, J., 2006. Bilan hydrique d'un système de cultures intercalaires (Olivier – Culture maraîchère) en Tunisie Centrale : Approche expérimentale et essai de modélisation. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II. 172 pages.

Allen, G., Pereira, S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration, Guideline for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper 56. FAO. Rome.

Bandino, G., Dettori, S., 2003. Manuale di olivicultura. Consorzio Interprovinciale per la Frutticoltura Cagliari. Oristano. Nuoro. Regione Autonoma della Sardegna.

Bahri-Haddad, A., 1981. Distribution des sels dans les sols en fonction de différentes techniques d'irrigation. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Bahri, A., 1982. Utilisation des eaux et des sols chargés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Doctorat Ing. Toulouse. 102 pages + Annexes.

Ben Mechlia, N., Hamrouni, A., 1978. Alternance et production potentielle chez l'olivier irrigué. Séminaire International sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia. 3-7 Juillet 1978. pp. 199-208.

Braham, M., 1997. Activité Ecophysiologique, état nutritif et croissance de l'olivier soumis à une contrainte hydrique. Thèse de Doctorat. Université de Gant. 233 pages.

Cabibel, B., 1991. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. III. Influence sur les flux de sève des modalités d'apport d'eau en irrigation localisée sur sol fissuré. Agronomie 11 : 877-887.

Cabibel, B., Do F., 1991 a. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. Agronomie 11: 669-678.

Cabibel, B., Do F., 1991 b. Mesures thermiques des flux de sève et comportement hydrique des arbres. II. Evolution dans le temps des flux de sève et comportement hydrique des arbres en présence ou non d'une irrigation localisée. Agronomie 11 : 757-766.

Cabibel, B., Isbérie C., 1997. Flux de sève et alimentation hydrique de cerisiers irrigués ou non en localisation. Agronomie 17, 97-112.

Caspari, H.W., Green, S.R., Edwards, W.R.N., 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse and estimated by a Penman-Monteith model. Agric. For. Meteorololy. 67, 13-27.

CEMAGREF, 1990. Guide pratique. Irrigation. Document élaboré par le groupe mixte CEMAGREF-DICOVA, CEP-France Agricole et RNED-HA. Edition CEMAGREF-DICOVA. p 319.

CEMAGREF, 1995. La conduite de l'irrigation. De la stratégie au pilotage de l'irrigation. Groupe 'Pilotage de l'Irrigation' RNED-AFEID-ANDA. Réseau National, Expérimentation, Démonstration, Secteur hydraulique agricole. Ed. V. Goulette, J. Baudet, Louis-Jean. 124 pages

Châabouni, M., 1982. L'économie de l'eau et les systèmes d'irrigation sur oliviers dans les conditions arides de la Tunisie. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture, Tunisie, Octobre 1982.

Chehab, H., 2007. Etude écophysiologique, agronomique, de production et relation source-puits chez l'Olivier de table en rapport avec les besoins en eau. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Institut National Agronomique de Tunisie.

Clothier, B.E., Green, S.R., 1994. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. Agric. Water Management. 25 :1-12.

Cohen, Y., 1991. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorology approach. Irrig. Sci., Vol 12, pp 93-98.

Clothier B.E., Green S.R., 1994. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. Agric. Water Management. 25: 1-12.

COI, 1997. L'olivier, Encyclopédie Mondiale de l'Olivier, Ed., Plaza and Janéf, 479 p.

Connor, D.J., Fereres, E., 2005. The Physiology of adaptation and yield expression in Olive. Horticultural Review, Volume 31, Edited by Jules Janick.

Connor, D.J., 2006. Towards optimal designs for hedgerow olive orchards. Australian Journal of Agricultural Research, 57, 1067-1072.

Cottenie, A., Verloo, M., Kiekens, L., Camerlynck, R., Velghe, G., Dhaese, A., 1983. Essential and non essential trace elements in the system soil – water - plant. Laboratory of analytical and agrochemistry state university. Gent-Belgium. 217 pages.

Cruiziat, P.,Tyree, M.T., 1990. La montée de la sève dans les arbres. La Recherche, N°220.

Cruz-Conde Suarez de Tangil, J., Fuentes-Cabanas, M., 1989. Irrigation goutte à goutte de l'oliveraie : doses d'eau. Olivae 25, pp 24-25.

CTIFL, 1999. Tensiométrie. Outils de pilotage. Bonnes pratiques en arboriculture fruitière. Fiche technique n°14. p 178.

Deidda, P., Dettorio, S., Filighueddu, M.R., Virdis, F., Pala, M., 1990. Lysimetric analysis of water requirements for young table - olive trees. Acta Horticulturae 286: 259-261. Et Olea 20, Page 73.

Dettori, S., 1987. Estimacion con los metodos de la F.A.O. de las necesidades de riego de los cultivos de aceitunas de mesa de Cerdena. Olivae 17 : 30-35.

Dettori, S., Russo, G., 1993. Influence du cultivar et du régime hydrique sur le volume de production et la qualité de l'huile d'olive. Revue OLIVEA 49 : 36-42.

Dichio, B., Romano, M., Nuzzo, V., Xiloyannis, C., 2002. Soil water availability and relationship between canopy and roots in young olive trees (Cv. Coratina). Acta Horticulturae 586 : 255-258.

Do, F., Rocheteau, A., Grouzis, M., 1998. Flux de sève et consommation en eau d'Acacia tortillis dans le Nord Ferlo. Dans « L'acacia au Sénégal » Orstom - Isra, 3-5 Décembre 1996, Dakar (Sénégal). Collection Colloques et Séminaires, 63-80.

Do, F., Rocheteau, A., 2002 a. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. Tree physiology 22: 641-648.

Do, F., Rocheteau, A., 2002 b. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. Tree physiology 22: 679-654.

Do, F., Rocheteau, A., 2003. Cycle annuel de transpiration d'Acacia raddiana par la mesure des flux de sève brute (Nord-Sénégal). In Un arbre au désert Acacia raddiana, Editeurs scientifiques Grouzis M., et Le Floc'h E., IRD Editions, 119-142.

El Amami, S., 1984. Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. PUB CRGR. 40 pages plus annexes.

FAO, 1976. Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'Irrigation et de Drainage 24.

FAO, 1986. Yield response to water. Bulletin d'Irrigation et de Drainage 33: 105-108.

FAO, 1987. Les besoins en eaux d'irrigation. Manuel de formation N°3.

FAO, 1989. Pilotage des irrigations. Manuel de formation N°4.

Fernandez, J.E., Moreno F., Martin-Aranda J., 1990. Study of root dynamics of olive trees under drip irrigation and dry farming. Acta Horticulturae 286:263-266.

Fernandez, J.E., Moreno F., Cabrera F., Arrue J.L., Martin-Aranda J., 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. Plant and soil 133:239-251.

Fernandez, J.E., Moreno, F., 1999. Water use by the olive tree. Journal of crop production, Vol. 2, N°2: 101-162.

Fernandez, J.E., Palomo M.J., Diaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Giron, I.F., Moreno F., 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnosis of water stress. Agriculture water Management, vol. 51, Issue 2, pp 99-123.

Fernandez, J.E., Paloma, M.J., Diaz-Espejo, A., Giron, I.F., 2003. Influence of partial soil wetting on water relation parameters of the olive tree. Agronomie 23: 545-552.

Fernandes Serrano, J.M., Vincent Abela, M., 1982. Premiers résultats de l'essai d'irrigation goutte à goutte sur la variété Galega vulgar. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture, Tunisie, Octobre 1982. Olea - juin 1984.

Gargouri, K., Mhiri, A., 2003. Relationship between soil fertility, phosphorus and potassium nutrition of the olive in Tunisia. Options Méditerranéennes, 50: 199-204.

Gargouri, K., 2012. Programme de ferti-irrigation d'une parcelle d'olivier selon l'âge. Présenté à l'occasion de la journée de formation adressée aux ingénieurs des CRDA. Ben Arous 2010.

Gendrier, J.P., Lichou, J., Baudry, O., Orts, R., Rondeau, S., Soing P., Mandrin, J.F., 1999. Outils de pilotage. Bonnes pratiques en arboriculture fruitière. Edition CTIFEL-ACTA. www.ctifel.fr. 202 p.

Giorio, G., D'Andria, R., 2002. Sap flow estimated by compensation heart-pulse velocity technique in olive trees under two irrigation regimes in Southern Italy. Acta Horticulturae. 586: 401- 404.

Goldhamer, A., Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Irrig. Sci. 20: 115-125.

Giorgio, P., Giorgio, G., 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse by continuous of a single gauge. Environmental an Experimental Botany 49, Issue 1: 9-20.

Goldhamer, D.A., Dunai, J., Ferguson, L., 1993. Water use requirements of Manzanillo olives and reponses to sustained deficit irrigation. Acta Hortic. 335, 365-371.

Gouard, P., 1975. L'irrigation de l'olivier: présent et avenir. Revue Olea. Décembre 1975, pp 26-52.

Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève brute dans le tronc des arbres. Ann. Sci.For. 42 (2): 193-200.

Granier, A., 1987 a. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology 3 : 309-320.

Granier, A., 1987 b. Mesure de flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Ann. Sci. For. 44 (1) : 1-14

Granier, A., Huc R., Barigah, S.T., 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. Agricultural and Forest Meteorology 78: 19-29.

Granier, A., Biron, P., Lemoine D., 2000. Water balance, transpiration and canopy conductance in tow beech stands. Agricultural and Forest Meteorology 100, 291-308.

Green, S.R., 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. Agricultural and Forest Meteorology, 64, 201-221.

Green, S.R., Clothier, B.E., 1988. Water use of Kiwi fruit vines and apple trees by the heat - pulse technique. J. Exp. Bot. 39 : 115-123.

Habaieb, H., Masmoudi-Charfi, C., 2003. Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées en Tunisie : Estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques. Cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte ». Sécheresse 14 (4) : 1-9. Décembre 2003.

Inglese, P., Barone, E., Gullo, G., 1996. The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening patter and soil characteristics of olive (Olea europaea L.) Cv. Carolea. Journal of Horticultural Science 71 (2): 257-263.

Institut de l'Olivier, 1994. Techniques de plantation de l'olivier. Série document technique n°2, 1994.

Kostner, B., Granier, A., Cermak, J., 1998. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties. Ann. Sci. For., 55: 13-27.

Mahjoub, I., 2004. Développement d'un dispositif de mesure du flux de sève des arbres. Projet de Fin d'Etude de l'INAT. 48 pages.

Masmoudi-Charfi, C., Masmoudi, M.M., Ben Mechlia, N., 2004 a. Irrigation de l'olivier : Cas des jeunes plantations intensives. Revue Ezzaitouna Vol 10 (1 et 2) : 37-51.

Masmoudi, M.M., Mahjoub, I., Masmoudi-Charfi, C., Karray-Abid, J., Ben Mechlia, N., 2004 b. Mise au point d'un dispositif de mesure du flux de sève xylémique chez l'olivier. Actes du Séminaire International : Aridoculture et Cultures Oasiennes. Numéro Spécial de la Revue de l'IRA. pp. 242-251. Djerba 22-25 Novembre 2004.

Masmoudi-Charfi, C., Msallem, M., Say, M.B., 2006. Plantations irriguées d'olivier. Document Technique n°2. Institut de l'olivier. 7 pages en langue arabe.

Masmoudi-Charfi, C., 2006. Gestion de l'irrigation dans les plantations d'olivier. Document Technique n° 3. Institut de l'olivier.13 pages en langue arabe.

Masmoudi, M.M., Masmoudi-Charfi, C., Mahjoub, I., Ben Mechlia, N., 2007. Water requirements of individual olive trees in relation to canopy and root development. Wasamed Project. Options Méditerranéennes. Proceedings of the International Conference on water harvesting in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs. 14-17 February 2007. Valenzano Italy. pp 73-80.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2007. Characterization of young olive trees growth during the first six years of cultivation. Adv. Hort. Sci. 21(2): 116-124.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. Adv. Hort. Sci. 22 (1): 8-12.

Masmoudi-Charfi, C., 2008. Caractérisation et modélisation de la croissance de l'olivier (Olea europaea L.) en rapport avec son alimentation en eau. Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques (PhD). Institut National Agronomique de Tunisie. 323 pages.

Masmoudi-Charfi, C., Ben Mechlia, N., 2009. Mineral uptakes of macro-nutrients in Tunisian olive (*Olea europaea* L.) orchards during the first years after plantation. Adv. Hort. Sci., 2009 23(4): 211-218

Masmoudi-Charfi, C., Karray-Abid, J., Mahjoub I., Masmoudi, M., Ben Mechlia, N., 2010. Gestion de l'eau dans les jeunes plantations d'olivier à travers la détermination du flux de sève xylémique. Séminaire National organisé dans le cadre des activités du LAPOAF et de l'avancement des travaux du projet Tuniso–Belge ZEIN2006PR32: Gestion des plantations d'olivier de table selon le concept « source – puits » et pilotage de l'irrigation en fonction de l'état hydrique et nutritionnel de l'arbre. Sousse - Juin 2010.

Masmoudi-Charfi, C., Masmoudi, M.M., Karray-Abid, J., Ben Mechlia, N., 2011. Sap flow Measurements in Young Olive Trees (Olea europaea L.) cv. 'Chétoui' Under

Tunisian Conditions. Accepté pour publication dans la Revue Scientia Horticulturae. Impact factor 1,2 (pour 2011).

Masmoudi-Charfi, C., Msallem, M., Kharrat, M., Larbi, A., Ben Dhiab, A., Bayoudh, C., 2011. Mise en place d'une oliveraie. Document technique élaboré dans le cadre des activités de la commission Nord pour la promotion du secteur oléicole. Edition AVFA. 20 pages.

Massai, R., Remorini, D., Ferreira, M.I., Paço, T.A., 2000. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. Proc. 3rd IS on Irrigation Hort. Crops. Eds Ferreira et Jones. Acta Hort. 537.

Mekki, H., 2009. La politique de l'eau en Tunisie. Conférence régionale sur la gouvernance de l'eau. Echange d'expériences entre L'OCDE et les pays arabes. CITET – Tunis, 8-9 Juillet 2009.

Michelakis, N., 1986. Olive behaviour under various irrigation conditions. Olea 17, pp 207-209.

Michelakis, N., Vouyoucalou, E., 1988. Water use, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. Olea 19, pp 17-31.

Michelakis, N., 1990. Yield response of table and oil olive tree varieties to different water doses under drip irrigation. Acta Horticulturae 286, pp: 271-274.

Michelakis, N., 1995. Effet des disponibilités en eau sur la croissance et le rendement des oliviers. Olivae 56: 29-39.

Michelakis, N., 1996. Water use and soil moisture depletion by olive trees under different irrigation conditions. Agricultural water management. Volume 29, Issue 3.

Michelakis, N., 2000. Water requirements of olive tree on the various vegetative stages. Proceedings of the International course on water management and irrigation of olive orchards. Cyprus. Avril 2000.

Michelakis, N., Vougioucalou E., 1988. Water use, root and top growth of olive trees for different methods of irrigation and levels of soil water potential. Olea 19: 17-31.

Michelakis, N., Vouyoucalou, E., Clpaki, G., 1993. Plant growth and yield response of the olive tree cv., Kalamon for different levels of soil water potential and method of irrigation. Olea (22).

Moreno, F., Fernandez, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R., 1996. Transpiration and root water uptake by olive trees. Plant and Soil 184: 85-96.

Moriana, A.F., Villalobos, J., Fereres, E., 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (Olea europaea L.) leaves to water deficits. Plant Cell Environment 25: 395-405.

Moriana, A.F., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield response of a mature olive orchard to water deficits. Journal of the American Society for Horticultural Science 128: 425-431.

Moriana, A.F., Perez-Lopez, D., Gomez-Rio, A., Salvador, M., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G., 2006. Irrigation scheduling for traditional low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics.

Nasr, Z., 1987. Une nouvelle technique de pilotage de l'irrigation des arbres : Mesure du flux de la sève par des méthodes thermiques. Mémoire de fin d'études du 2ème cycle de l'INAT. 70 Pages.

Nicolas, E., Torreciallas, A., Ortuno, M.F., Domingo, R., Alarcon, J.J., 2005. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. Agr. Water Manag. Vol. 72: 131-145.

Nuberg, I., Yunusa, I., 2003. Olive water use and yield. Report for the rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication No 03/048. RIRDC Project No UA-47A.

Laouer, S., 1978. Quelques aspects de l'économie de l'eau chez l'olivier en conditions variables d'alimentation hydrique. Séminaire sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia, Tunisie, pp. 105-116.

Larbi A., 2010. Création d'un verger oléicole. Communication présentée à l'occasion de la journée de formation pour les CRDA du Nord. Avril 2011.

Lavee, S., 1997. Biology and Physiology of the olive. In World Olive Encyclopedia. Ed. C.O.I., pp. 59-110.

Le Bourdelles, J., 1977. Irrigation par goutte à goutte en Oléiculture. Principe de la méthode, Installations et Fonctionnement. Olea, Juin 1977.

Le Bourdelles, J., 1982. L'eau en Oléiculture. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Le Bourdelles, J., 1984. Activités du sous réseau sur l'utilisation de l'eau en Oléiculture. Résultats obtenus et Orientations nouvelles de la recherche. Réunion commémorative du 10ème Anniversaire du Réseau Coopératif Européen de Recherche en Oléiculture, 5 pages.

Llamas, J.F., 1984. Basis of fertilization in olive cultivation and the olive tree's vegetative cycle and nutritional needs. International Course on the fertilization and intensive cultivation of the Olive. Cordoba. pp. 1 - 25.

Loussert, R., Brousse, G., 1978. L'Olivier. Techniques Méditerranéennes et Productions Agricoles Tome 1. G.P. Maisonneuve et Larose, Paris. Tome 1.

Lousteau, D., Granier, A. El hadj Moussa, M., 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. Ann. For. Sci. 21: 599-618.

Lu, P., Urban, L. Zhao, P., 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica 46 (6): 631-646.

ONH., 2006. Journées d'étude relatives au développement de l'oléiculture à huile. 19-20 Décembre 2006. Tunis.

Ozyilmaz, H., Ozkara, M., 1989. Determination of water consumption of the olive tree in the field conditions. Olea n°20, page 78.

Palese, A.M., Nuzzo, V., Dichio, B., Celano, G., Romano, M., Xiloyannis, C., Ferreira, M.I., Jones, H.G., 2000. The influence of soil water content on root density in young olive trees. Acta Hort. 537: 329-336.

Palomo, M.J., Diaz-Espejo, A., Fernandez, J.E., Giron, I.F., Moreno, F., 1998. Using sap flow measurements to quantify water consumption in the olive tree. Water and Environment, Innovative issues in Irrigation and drainage, Ed. Luis S. Pereira and J. W. Gowing, 205-212.

Palomo, M.J., Moreno, F., Fernandez, J.E., Diaz-Espejo, A., Giron, I.F., 2002. Determining water consumptive in olive orchards using the water balance approach. Agr. Wat. Mang. Vol 55, Issue 1, 15-35.

Pansiot, F.R., Rebour, H., 1961. Improvement in olive cultivation. Ed. FAO, 249 Pages.

Pansiot, F.R., 1977. La pratique de l'irrigation dans l'oliveraie. Manuel d'Oléiculture. pp 147-164.

Pastor, M., Orgaz, F., 1994. Riego deficitario del olivar. Agricultura 746: 768-776.

Pastor, M., Hodalgo, J., Vega, V., Castro, J., 1998. Irrigation des cultures oléicoles dans la région de la LOMA (Province de Jaén). Olivae n°71.

Phocaides, A., 2008. Manuel des techniques d'irrigation sous pression. FAO - Seconde Edition.

Piedra, P.A., Humanes, G.J., Munoz-Cobo, P., Martin, S., 1997. Plantations à haute densité. Concepts nécessaires. Olivae 69, Décembre 1997.

Poli, M., 1979. Etude bibliographique de la physiologie de l'alternance de production chez l'olivier (Olea europaea L.), Fruits 34 : 687-695.

Psyllakis, N., 1973. Recherches de tests pour l'aptitude des variétés d'olivier à la culture irriguée. Application aux variétés Koroneiki et Mastoidis. Rapport du Réseau de recherches sur la bioclimatologie de l'olivier.

Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. European Journal of Agronomy 13: 125-153.

Rallo, L., 1998. Fructification y produccion, In El Cultivo del olivo. Junta de Andalucia y Grupo Mundi-Prensa, pp: 107-136.

Rallo, P., Rapoport, H.F., 2001. Early growth and development of the olive fruit mesocarp. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 76 (4): 408-412.

Rejeb, S., Bouaziz, E., 1981. Etude de la nutrition minérale de l'olivier irrigué à l'eau saumâtre. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie. Octobre 1982.

Rhaiem, H., 1971. Etude du bilan hydrique sur olivier en culture sèche. Bulletin ENSAT, pp 28-29.

Riou, C., 1978. Quelques aspects du bilan hydrique d'une plantation d'oliviers. In: Séminaire sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia 1978. pp. 101-104. Ed. O.N.H.

Romano, M.E., 1977. L'irrigation de l'olivier. Manuel d'Oléiculture. Chapitre 7, pages 137-146. Doc F.A.O. pour l'alimentation et l'agriculture.

Samish, R.H., Spiegel, P.,1966. L'influence de l'irrigation sur la croissance de l'Olivier pour la production d'huile. Informations Oléicoles Internationales 34 : 53-63.

Sanz-Cortès, F., Martinez-Calvo, M.L., Badenes, H., Bleiholder, H., Hack, G., Llacer Meier U., 2002. Phenological growth stages of olive trees (Olea europaea). Ann. Appl. Biol., 140:151-157.

Smith, D.M., Allen, S.J., 1996. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, Vol 47, No. 305, pp. 1833-1844.

Snane, M.H., Toumi, M., Chaabouni, Z., 1991. Un modèle d'optimisation des pluies pour les oliveraies. Revue Sécheresse 2: 12-16.

Stylianou, Y., Metochis, C., 1982. Expériences sur l'irrigation des oliviers à Chypre. Institut pour la Recherche Agricole Nicosie, Chypre. 1977-1981. Séminaire International sur l'utilisation des eaux chargées en Oléiculture. Tunisie, Octobre 1982.

Sole-Riera, M.A., 1989. The influence of auxilary drip irrigation with low quantities of water on olive trees in Las Garrigas (Cv Arbequina). Revue Olea 20, page 86 et Acta Horticulturae 286: 307-310.

Studutto, P., 1996. Water use efficiency. L.S. Pereira *et al.,* (Eds). Sustainability of Irrigated Agriculture, 193-209.

Swanson, R.H., 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. Agricultural and Forest Meteorology 72: 113-132.

Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. Agricultural and Forest Meteorology 121: 1 –18.

Therios, L., 2009. Olives. Crop prodcution Science in Horticulture. Edition Biddles Ltd. King's Lynn. www.cabi.org. 407 pages.

Tiercelin, J.R., 1998. Traité d'irrigation. Edition LAVOISIER. Technique et Documentation. 1011p.

Tron, G., Isbérie, C., Chol, P., 2000. La tensiométrie pour piloter les irrigations. Une gestion raisonnée de la ressource en eau. Edition Educagri. 247 pages.

Vernet, A., Damagnez, J., De Ville, O., 1964. Besoins en eau de l'Olivier et action de l'irrigation sur la production. Influence de la salure. Informations Oléicoles Internationales, 27, pages 11-26.

Vernet, A., Mousset, P., Gouayeb, O., 1970. Alimentation en eau de l'olivier. Séminaire Oléicole National. Sfax 27- 29 Janvier 1970.

Villagra, M.M., Bacchi, O.O.S., Tuon, R.L., Reichardt, K., 1995. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. Agricultural and Forest Meteorology. 72: 317-325.

Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L., Fereres, E., 2000. Measurement and modelling of evapotranpiration of olive (Olea europaea L.,) orchards. European Journal of Agronomy 13: 155-163.

Villemur, P., Delmas, J.M., 1978. Croissance, développement et alternance de production. Séminaire International sur l'olivier et autres plantes oléagineuses cultivées en Tunisie. Mahdia, 3-7 Juillet 1978.

Xiloyannis, C., Dichio, B., Nuzzo, V., Celano, G., 1999. Defence strategies of olive against water stress. Proceeding of the 3rd International ISHS Symposium on olive growing. Eds. I.T. Metzidakis and D.G., Voyiatzis. Acta Hort. 474, ISHS.

Xiloyannis, C., Celano, G., Palese, A.M., Dichio, B., Nuzzo, V., 2002. Mineral nutrient uptake from the soil in irrigated olive trees, cultivar Coratina over six years after planting.- Acta Horticulturae, 386: 453-456.

Références électroniques

www.afidol.org. Conduite des oliviers. Article d'AFIDOL élaboré dans le cadre du programme Olea 2020.

www.afidoltek.org/index.php/La_conduite_de_l'irrigation

www.afidoltek.org/index.php/Les_besoins_en_eau_de_l'olivier (pluie efficace).